



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 697 25 145 T2 2004.08.05**

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 910 863 B1**

(51) Int Cl.⁷: **G01D 5/353**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **697 25 145.4**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US97/11906**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **97 934 895.0**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 98/002898**

(86) PCT-Anmeldetag: **10.07.1997**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **22.01.1998**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **28.04.1999**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **24.09.2003**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **05.08.2004**

(30) Unionspriorität:

21699 P	12.07.1996	US
34804 P	02.01.1997	US
36114 P	17.01.1997	US
814548	11.03.1997	US

(74) Vertreter:

derzeit kein Vertreter bestellt

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB, IT, NL

(73) Patentinhaber:

**The Board of Trustees of the Leland Stanford
Junior University, Stanford, Calif., US**

(72) Erfinder:

**HODGSON, Craig W., Thousand Oaks, US;
WAGENER, L., Jefferson, Charlottesville, US;
DIGONNET, J., Michel, Palo Alto, US; SHAW, John,
H., Stanford, US**

(54) Bezeichnung: **VERSTÄRKTE SENSORGRUPPEN**

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 vorliegende Erfindung betrifft Gruppen von faseroptischen interferometrischen Sensoren und Mechanismen zur Maximierung des Signal/Rausch-Verhältnisses in verstärkten Sensorgruppen, die zeitmultiplexiert sind.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0002] Gruppen von faseroptischen interferometrischen Sensoren sind in solchen Anwendungen vielversprechend, wo Größe, elektrische Störung und elektromagnetische Messung elektronische Sensoren unpraktisch machen (Joar Saether: Optical Amplifiers in Multiplexed Sensor Systems – Theoretical Prediction of Noise Performance, Proceedings 11th Optical Fibre Sensor Conference, Sapporo, 21. bis 24. Mai 1996, S. 518–521). Solche interferometrischen Sensoren sind in der Lage, einen Parameter (d. h. eine Meßgröße) mit einem sehr hohen dynamischen Bereich (z. B. 120 dB) zu messen. Optische Sensorgruppen entstehen, wenn eine Serie von Sensoren unter Verwendung faseroptischer Leitungen verbunden wird. Wenn jeder Sensor in einer Gruppe eine zugeordnete Faser erfordert, um das Erfassungssignal zu transportieren, wird die große Anzahl von erforderlichen Fasern schnell unhandlich, wenn sich die Anzahl der Sensoren vergrößert. Wenn sich die Anzahl der Sensoren in einer optischen Sensorgruppe vergrößert, wird die Zeitmultiplexierung (TDM) notwendig, um eine niedrige Faseranzahl beizubehalten. Elektrische und optische Frequenzmultiplexierung sind bisher versucht worden, sie sind jedoch bei Gruppen mit Hunderten von Sensoren nicht handhabbar. Infolgedessen werden große Sensorgruppen in langen Ketten von Sensoren, die TDM durchführen, organisiert, indem Information von den Sensoren, die in diskreten Intervallen angeordnet sind, zurückgeführt wird. Eine typische passive Sensorgruppe, die TDM verwendet, ist in einer leiterartigen Konfiguration aufgebaut. Diese Ausführung hat nur wenige Faserleitungen und ermöglicht geringe Ausmaße beim Einsatz. Es ist erwünscht, ein Multiplexierungsschema bereitzustellen, das eine große Anzahl von interferometrischen Sensoren in einer Gruppe aufweist, während gleichzeitig ein hoher dynamischer Bereich der Sensoren beibehalten wird, und das ein hohes Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) beibehält.

[0003] Wie in **Fig. 1** gezeigt, entsteht eine herkömmliche passive optische Sensorgruppe **10**, die TDM verwendet, wenn ein Splitter-Koppler **140** verwendet wird, um einen Verteilungsbus **100** mit einem ersten Ende eines optischen Sensors **110** zu koppeln. Ein zweiter Splitter-Koppler **142** koppelt einen Rückführungsbus **120** mit einem zweiten Ende eines optischen Sensors **110**. Ein Erfassungssignal wird von einer Quelle (nicht dargestellt) gesendet, das dann teilweise in den ersten Sensor **110** in einer Gruppe von n Sensoren eingekoppelt wird. Der Rest des Erfassungssignals läuft entlang des Verteilungsbusses weiter zu nachfolgenden Kopplern, wobei jeder einen Bruchteil des Erfassungssignals in aufeinanderfolgende Sensoren eingekoppelt.

[0004] Jeder Sensor modifiziert das optische Signal, das vom Verteilungsbus **100** in ihn eingekoppelt wird, auf der Grundlage von externen (z. B. akustischen) Störungen, die zu erfassen sind. Das gestörte Signal wird dann durch einen Koppler **142** in den Rückführungsbus **120** eingekoppelt. Der Rückführungsbus überträgt dann die gestörten Signale aus der Sensorgruppe zwecks Verarbeitung.

[0005] Das Hauptprinzip von TDM ist folgendes. Die Länge des Weges, den das optische Signal von der Quelle, entlang des Verteilungsbusses **100**, durch den Koppler **140**, den Sensor **110**, den Koppler **142** zurücklegt und zurück entlang des Rückführungsbusses **120**, ist für jeden Sensor unterschiedlich. Deshalb treffen die Rückführungssignale am Detektor in verschiedenen Zeitintervallen in Abhängigkeit von der Weglänge ein. Sensoren, die näher an der Signalquelle sind, haben einen kürzeren Weg als Sensoren, die näher am Ende der Sensorgruppe sind. Sensoren nahe der Quelle legen die Rückführungssignale geringfügig früher auf den Rückführungsbus als die Sensoren, die weiter hinten in der Sensorgruppe sind. Es wird angenommen, daß die Zeitverzögerung in jedem der Sensoren relativ gleich ist. Die Signale werden dann von der Sensorgruppe nach draußen übertragen, um durch andere Hardware sequentiell verarbeitet zu werden, um die erfaßte Information zu entnehmen. Da jedes der Rückführungssignale wegen unterschiedlicher Entfernungen zwischen dem Sensor und der Quelle eine andere Zeitverzögerung hat, können optische Signale in einer Impulsform verwendet werden. Aufgrund dessen gibt jeder Sensor **110** einen Signalimpuls zurück, der gegenüber einem Signalimpuls, der vom vorherigen Sensor zurückgegeben wird, geringfügig verzögert ist und ermöglicht dadurch, daß die verschiedenen Signalimpulse am Detektor zeitlich getrennt sind. Um eine Überschneidung der zurückgeführten Signale im Rückführungsbus **120** und am Detektor zu vermeiden, werden die Impulslängen und die Frequenz der optischen Signale so gewählt, daß die Rückführungssignale im Rückführungsbus einander nicht überschneiden.

[0006] **Fig. 8** stellt ein Zeitdiagramm für eine Sensorgruppe dar, die TDM verwendet, um die Rückführungssignale im Rückführungsbus zur Erfassung und Verarbeitung zu multiplexieren. In der Zeitperiode 1 gibt die Signalquelle einen Meßimpuls der Länge τ aus. Die Signalquelle wartet dann eine Periode T_{System} , bevor sie

sich zurücksetzt und den Meßimpuls (dargestellt als Zeitperiode 1') wiederholt. Wenn der Meßimpuls von der Signalquelle ausgegeben worden ist, wird er zu jedem Sensor verteilt. Das Signal von jedem Sensor kehrt in Abhängigkeit von der jeweiligen Entfernung des Sensors von der Signalquelle zu einer anderen Zeit zurück. Die Weglängen sind sorgfältig gewählt, so daß die Rückführungssignale in aufeinanderfolgenden Intervallen nur mit einem kurzen dazwischenliegenden Schutzband ($T_{\text{Guardband}}$) zwischen den Rückführungssignalen auf den Rückführungsbus gelegt werden, um eine Signalüberschneidung zu verhindern. Wenn der letzte Sensor ein Signal N an den Detektor zurückgegeben hat, wartet das System eine Rücksetzperiode (T_{Reset}) und startet dann den Prozeß erneut. Die Periode T_{Reset} ist so gewählt, daß sichergestellt wird, daß der Rückführungsimpuls N vom letzten Sensor am Detektor ankommt, bevor der Rückführungsimpuls 1' vom ersten Sensor als Antwort auf den zweiten Meßimpuls ankommt. Eine exemplarische Periode für T_{Reset} ist annähernd gleich $T_{\text{Guardband}}$. Die Wiederholungsperiode für T_{System} ist annähernd gleich $N \times (\tau + T_{\text{Guardband}})$. Bei einem System mit einer Wegdifferenz von annähernd 8,2 m zwischen benachbarten Sensoren wird τ beispielsweise so gewählt, daß es annähernd 40 ns beträgt, und $T_{\text{Guardband}}$ wird so gewählt, daß es 1 ns entspricht. Wenn die Sensorgruppe so konfiguriert ist, daß sie 300 Sensoren aufweist (d. h. $N = 300$), dann ist T_{System} annähernd 12,3 ms. Bei dieser exemplarischen Konfiguration stellt die Wiederholungsrate von 80 kHz sicher, daß sich das letzte Rückführungssignal als Antwort auf einen Meßimpuls nicht mit dem ersten Rückführungssignal als Antwort auf den nächsten Meßimpuls überschneidet. Man beachte, daß in **Fig. 8** der Zeitversatz zwischen dem Meßimpuls und dem ersten Rückführungsimpuls nicht dargestellt ist, da sich der Versatz entsprechend der optischen Weglänge von der Quelle bis zum ersten Sensor, durch den ersten Sensor und zurück zum Detektor ändert.

[0007] Der Vorteil von TDM besteht darin, daß es einfache Abfragetechniken ermöglicht. Es ist keine Schaltbetriebshardware notwendig, was eine Reduzierung der Kosten und der Größe der Sensorgruppe ermöglicht. Eines der Probleme bei TDM besteht jedoch darin, daß es die Zeit reduziert, in der jeder Sensor für die Erfassung verfügbar ist. Wenn jedem Sensor eine zugeordnete Faser zugeteilt wäre, um das Ergebnis seiner Erfassungen zu melden, könnte ein kontinuierlicher Informationsstrom bereitgestellt werden. Wenn TDM jedoch so implementiert ist, daß die Anzahl der Fasern reduziert ist, ist keine solche kontinuierliche Meldung möglich. Die Zeitdauer, in der jeder Sensor abgetastet wird, ist auf $1/N$ eines kontinuierlichen abgetasteten Sensors reduziert. Da die Anzahl der Sensoren wächst, wird die Zeitdauer und die Frequenz, in der jeder Sensor abgetastet wird, weiter reduziert.

[0008] Die begrenzte Abtastzeit erhöht die Signifikanz des Signal/Rausch-Verhältnisses (SNR). Da unter TDM ein kurzer Abtastwert extrapoliert wird, um eine viel längere Periode (N -mal länger als seine tatsächliche Abtastzeit) darzustellen, ist es viel wichtiger, daß jeder Abtastwert vom Detektor richtig interpretiert wird. Rauschen ist eine signifikante Quelle für Interpretationsfehler, und deshalb muß das SNR bei einer möglichst geringen Verschlechterung des SNR entlang der Sensorgruppe so hoch wie möglich gehalten werden. Ein hohes SNR reduziert die Anzahl der Interpretationsfehler des Erfassungssystems.

[0009] Das Erfassungssignal erleidet eine signifikante Dämpfung, wenn es durch die passive Sensorgruppe läuft. Die Dämpfungsursachen sind u. a. beispielsweise (1) Faserdämpfung, Spleißdämpfung und Kopplereinfügungsdämpfung, (2) Sensordämpfung und (3) Leistungsverteilung an jedem Koppler im Verteilungs- und Rückführungsbus.

[0010] Eine einfache Verteilung (Dämpfungspunkt (3)), was das Verfahren ist, das verwendet wird, um den optischen Sensor mit dem Verteilungs- und dem Rückführungsbus zu koppeln, führt zu großen Dämpfungen und zu einer ernsten Verschlechterung des SNR. Die Lichtmenge im Erfassungssignal, das aus dem Verteilungsbus in den Sensor eingekoppelt wird, hängt vom Kopplungsfaktor des Kopplers ab. Der Kopplungsfaktor stellt annähernd den Bruchteil des Lichts dar, der zu den Sensoren verteilt wird, und annähernd eins minus Kopplungsfaktor ist der Bruchteil des Lichts, der entlang des Verteilungsbusses bis zum nächsten Koppler geleitet wird. Ein hoher Kopplungsfaktor führt dazu, daß an jeden Sensor mehr Leistung vom Verteilungsbus abgegeben wird, führt jedoch auch zu einer kleineren verfügbaren Leistungsmenge für die nachgeschalteten Sensoren. Ein niedriger Kopplungsfaktor erhöht die Leistung, die an die nachgeschalteten Elemente abgegeben wird, begrenzt jedoch die verfügbare Leistung für jeden Sensor. Folglich gibt es einen Wert für den Kopplungsfaktor, der die Rückführungsleistung von den entferntesten Sensoren maximiert, wie nachstehend beschrieben.

[0011] In einer Sensorgruppe, die N Sensoren enthält, verringert sich die Leistung, die vom m -ten Sensor zurückgeführt wird, wenn sich m erhöht (wobei der Sensor $m = 1$ Sensor ist, der der Quelle am nächsten ist). Die Ausnahme bildet das Signal vom letzten Sensor N , der keine Verteilungsdämpfung erleidet, da keine Kopplung vorhanden ist und der gesamte Rest des Signals durch ihn hindurchläuft. In der passiven Sensorgruppe, die in **Fig. 1** gezeigt ist, ist daher das Rückführungssignal beim Sensor Nr. $N-1$ am schwächsten. Um das beste Ausgangssignal/Rausch-Verhältnis in einer passiven optischen Sensorgruppe zu erreichen, sollte das Signal am Detektor (1) eine so hohe Leistung transportieren, wie es die Nichtlinearitätseffekte in den Faserbussen zulassen, und (2) sollte schrotrauschbegrenzt sein (ein Zustand, bei dem Quantenrauschen, das in der Quelle des Signals entsteht, die Rauschcharakteristik des Signals dominiert).

[0012] Ohne bestimmte optische Leistungen, Integrationszeiten, Impulsbreiten, Wiederholungsraten und die

optische Filterung anzugeben, was benötigt wird, um einen absoluten Ausgangs-SNR zu bestimmen, definieren die folgenden Gleichungen eine Systemrauschzahlkomponente, die verwendet werden kann, um verschiedene Sensorgruppen-Konfigurationen zu vergleichen. Die in Betracht kommende Rauschzahl ist der Eingangsquellen-SNR, geteilt durch den Ausgangs-SNR für den schlechtesten Sensor in der Sensorgruppe (der N-minus-erste Sensor). Die Systemrauschzahl (NF) ist folgendermaßen definiert:

$$NF_{\text{system}} = \frac{SNR_{\text{into array}}}{SNR_{\text{out worst sensor}}} \quad (1)$$

[0013] Diese Definition stimmt mit der klassischen Definition des Verstärkerausgangs überein, wird jedoch hier verwendet, um das Gesamtsystem als verstärkungslose Transformation zu beschreiben.

[0014] Um die Rauschzahl des Systems zu bestimmen, müssen die Dämpfungen, die den verschiedenen Elementen des Systems (z. B. Spleißdämpfungen, Verteilungsdämpfungen, Kopplerdämpfungen usw.) berechnet werden. Diese Dämpfungen (L) werden in dB angegeben (insbesondere negative dB-Werte). Die Dämpfung kann auch als Lichtdurchlässigkeit angegeben werden. Beispielsweise entspricht eine Dämpfung von -3 dB einer Lichtdurchlässigkeit von 50% und eine Dämpfung von -10 dB einer Lichtdurchlässigkeit von 10%. Es wird angenommen, daß jeder Sensor dem Signal die gleiche Dämpfung L_s auferlegt und die übermäßige Dämpfung aufgrund von Spleißen und Kopplereinfügung der bei allen Kopplersegmenten gleich ist und L_x entspricht. Wenn alle Koppler den gleichen Kopplungsfaktor C aufweisen, dann kann gezeigt werden, daß die Leistung, die von einem Sensor Nummer m zum Detektor zurückgeführt wird, folgende ist:

$$p_m = P_{\text{into array}} (1 - C)^{2m-2} L_x^{2m-2} C^2 L_s \quad \text{für } m < N \quad (2)$$

[0015] Bei der Ausführungsform, die in **Fig. 1** gezeigt ist, empfängt der Sensor N eine höhere optische Leistung als der Sensor N-1, da der Sensor N direkt mit der Verteilungsfaser verbunden und nicht mit ihr gekoppelt ist. Die Leistung für den Sensor N ist:

$$P_N = p_{\text{into array}} (1 - C)^{2N-2} L_x^{2N-2} L_s \quad (3)$$

[0016] Die Rückführungsleistung ist also bei dem Sensor Nr. N-1 am niedrigsten. In der Gleichung 2 hängt diese Leistung vom Kopplungsfaktor C ab und ist am größten, wenn:

$$C = \frac{1}{N-1} \quad (4)$$

[0017] Wenn man die Gleichungen 1 und 2 verwendet und einen optimierten Kopplungsfaktor (Gleichung 4) annimmt, ist die Rauschzahl für den schlechtesten Sensor folgende:

$$NF_{\text{passive}} = \frac{(N-1)^{2N-2}}{L_s L_x^{2N-4} (N-2)^{2N-4}} \quad (5)$$

[0018] **Fig. 4b** zeigt die Rauschzahl für die optimierte passive Sensorgruppe (durchgezogene Kurve), wenn die Zahl der Sensoren zunimmt. Es wird angenommen, daß die Sensordämpfung $L_s = 6$ dB ist, und diese stimmt mit der aktuellen Sensortechnologie überein. Es wird angenommen, daß die Zusatzdämpfung.

[0019] Um längere Sensorgruppen zu erhalten, muß eine passive optische Sensorgruppe eine Reduzierung der Leistung akzeptieren, die für jeden einzelnen Sensor möglich ist, und dadurch entsteht eine Verschlechterung des SNR. Wenn man diese Beschränkungen berücksichtigt, ist eine Maximierung des SNR in TDM-Sensorgruppen bisher schwierig gewesen. Eine Lösung besteht darin, die Leistung der optischen Quelle zu erhöhen, die unter schrotrauschbegrenzten Bedingungen das SNR aller Rückführungssignale erhöht. Die maximale Leistung, die der Verteilungsbus durchlassen kann, ist jedoch durch Nichtlinearitätseffekte in der optischen Faser begrenzt. Eine passive Sensorgruppenausführung ist daher in ihrer Fähigkeit begrenzt, die niedrige Leistung, die in jeden Sensor eingekoppelt wird, durch Erhöhung der Anfangsleistung der optischen Quelle zu kompensieren.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0020] Da das SNR ein großer Faktor bei der Leistungsfähigkeit einer optischen TDM-Sensorgruppe ist, kann man sich nicht den Grenzen der gegenwärtigen Sensortechnologie nähern, wenn die Rauschpegel im resultierenden Erfassungssignal hoch sind, und die Vorteile der hochempfindlichen Sensoren können nicht ausgenutzt werden. Aus diesem Grund müssen die Architektur- und Konstruktionsparameter der Sensorgruppen so gewählt werden, daß die SNR-Verschlechterung infolge der Teilung, anderer Faserdämpfungen und des Auf-

treten weiteren Rauschens minimiert wird. Die vorliegende Erfindung verbessert das SNR in einem passiven optischen Sensorfeld deutlich, indem optische Verstärker zwischen die Koppler eingefügt werden, um die Kopplerverteilungsdämpfungen zu kompensieren.

[0021] In einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden optische Verstärker entlang des Signalweges zwischen die Koppler eingefügt. Die Verstärkung der Verstärker ist so bemessen, daß die Dämpfungen infolge des vorherigen Kopplers und der anderen Faserdämpfungen kompensiert werden. Auf diese Weise kann das gesamte SNR ohne deutliche Verschlechterung beibehalten werden, wenn die Anzahl der Sensoren in der Sensorgruppe zunimmt. Unter einem ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung sind die Verstärker entlang den Verteilungs- und Rückführungsbussen direkt nach den Kopplern angeordnet (mit Ausnahme des letzten Sensors). Unter einem zweiten Aspekt der vorliegenden Erfindung sind die Verstärker direkt vor den Kopplern angeordnet.

[0022] In einer Ausführungsform umfassen die optischen Verstärker kurze Längen einer erbiumdotierten Faser, die in den Verteilungs- und Rückführungsbuss eingespleißt sind. Preiswerte Pumpquellen können verwendet werden, um die Verstärker von einem oder von beiden Enden der Sensorgruppe mit 1480 nm oder 980 nm bei einer Er-dotierten Faser und mit 1060 nm bei einer Er/Yb-dotierten Faser zu pumpen.

[0023] Verbesserungen am SNR können durchgeführt werden, wenn die Verteilungsbuskopplungsfaktoren auf optimale Werte eingestellt sind. Der Wert des optimalen Kopplungsfaktors hängt von der Verstärkerkonfiguration, von der Zusatzdämpfung und von anderen Konfigurationsparametern ab.

[0024] Zusätzliche Vorteile können erreicht werden, wenn die Sensoren zu parallelen Konfigurationen entlang des Verteilungs- und Rückführungsbusses gruppiert werden. Auf diese Weise kann die Anzahl der Sensoren ohne eine entsprechende Erhöhung der Anzahl der erforderlichen Verstärker deutlich erhöht werden. Die parallele Gruppierung mehrerer Sensoren kann die Sensordichte ohne eine entsprechende Erhöhung der Anzahl der Verstärker oder Koppler erhöhen. Diese Ausführung kann das SNR verbessern, indem die Gesamtanzahl der Verstärker und Koppler reduziert wird, wodurch das Spontanemissionsrauschen und die Koppeldämpfungen des Verstärkers reduziert werden. Außerdem werden die Pumpleistungsanforderungen reduziert. Dieser Aspekt der vorliegenden Erfindung ermöglicht auch kleiner bemessene Sensorgruppen bei einer äquivalenten Anzahl von Sensoren.

[0025] Unter einem ersten Aspekt stellt die Erfindung eine optische Sensorarchitektur bereit, wie sie im beigefügten Anspruch 1 ausgeführt ist.

[0026] Vorzugsweise umfaßt eine optische Sensorarchitektur eine Vielzahl von Sensoren, die ein optisches Signal empfangen und die gestörte optische Signale ausgeben. Ein Verteilungsbuss ist mit jedem Sensor gekoppelt, um das optische Signal zu jedem Sensor zu verteilen. Ein Rückführungsbuss ist mit jedem Sensor gekoppelt, um das gestörte optische Signal von jedem Sensor zu empfangen, um als Teil des Rückführungssignals einbezogen zu werden. Eine Vielzahl erster optischer Verstärker ist an gewählten Positionen entlang der Länge des Verteilungsbusses verteilt, um die Leistung des verteilten optischen Signals auf einem gewählten Pegel zu halten. Eine Vielzahl zweiter optischer Verstärker ist an gewählten Positionen entlang der Länge des Rückführungsbusses verteilt, um die Leistung der gestörten optischen Signale im Rückführungssignal beizubehalten.

[0027] Wahlweise umfaßt eine optische Sensorarchitektur eine Vielzahl von Sensorgruppen. Jede Sensorgruppe umfaßt mindestens einen Sensor, der ein optisches Signal empfängt und ein gestörtes optisches Signal ausgibt. Ein Verteilungsbuss ist mit der Sensorgruppe gekoppelt, um das optische Signal an jede Sensorgruppe zu verteilen. Ein Rückführungsbuss ist mit jeder Sensorgruppe gekoppelt, um das gestörte optische Signal von jeder Sensorgruppe zu empfangen. Eine Vielzahl von ersten optischen Verstärkern ist an gewählten Positionen entlang der Länge des Verteilungsbusses verteilt, um die Leistung des optischen Signals für jede Sensorgruppe auf einem angemessenen Pegel zu halten. Eine Vielzahl von zweiten optischen Verstärkern ist an gewählten Positionen entlang der Länge des Rückführungsbusses verteilt, um die Leistung der gestörten optischen Signale im Rückführungsbuss beizubehalten.

[0028] Normalerweise umfaßt eine optische Sensorarchitektur eine Vielzahl von Einrichtungen zum Erfassen eines Parameters; Einrichtungen zum Verteilen eines ersten optischen Signals an jede der Einrichtungen zum Erfassen; Einrichtungen zum Zurückführen eines zweiten optischen Signals von jeder der Einrichtungen zum Erfassen; eine Vielzahl von Einrichtungen zum Verstärken des ersten optischen Signals, das entlang der Einrichtungen zum Verteilen beabstandet ist; und eine Vielzahl von Einrichtungen zum Verstärken des zweiten optischen Signals, das entlang der Einrichtungen zum Zurückführen beabstandet ist.

[0029] Unter einem zweiten Aspekt stellt die Erfindung ein Verfahren bereit, das im beigefügten Anspruch 31 ausgeführt ist.

[0030] Vorzugsweise verwendet ein Verfahren zur Reduzierung eines Rauschzahlpegels bei einer Signalarückführung von einer Sensorarchitektur zur Erzeugung eines optischen Ausgangssignals eine Vielzahl von Sensoren zur Erzeugung von Ausgangssignalen. Ein optisches Signal wird über einen Verteilungsbuss übertragen, der mit jedem Sensor gekoppelt ist. Das Ausgangssignal von jedem Sensor wird in ein Rückführungssignal eingekoppelt, das über einen Rückführungsbuss transportiert wird, der mit jedem Sensor gekoppelt ist. Die

optischen und Rückführungssignale werden in mehreren Stufen entlang des Verteilungs- und des Rückführungsbusses verstärkt, um ein Signal/Rausch-Verhältnis in der Sensorarchitektur zu erhöhen.

[0031] Wahlweise wird in einem Verfahren zur Optimierung einer Gruppe von optischen Sensoren eine Gruppe von optischen Sensoren bereitgestellt, die zwischen einer Verteilungsfaser, die ein optisches Eingangssignal von einer Quelle weiterleitet, und eine Rückführungsfaser, die ein gestörtes optisches Signal an einen Detektor zurückführt, positioniert sind. Jeder optische Sensor ist durch einen entsprechenden Eingangskoppler mit einer Verteilungsfaser gekoppelt und durch einen entsprechenden Ausgangskoppler mit einer Rückführungsfaser gekoppelt. Eine Vielzahl von Verstärker ist an ausgewählten Stellen in der Eingangsverteilungsfaser und der Rückführungsfaser dazwischengeschaltet. Die Verstärker kompensieren die Dämpfungen in der Sensorgruppe. Es werden Kopplungsfaktoren für die Koppler gewählt, und es werden Verstärkungen für die Verstärker gewählt, um eine Systemrauschzahl zu optimieren. Die Systemrauschzahl ist das Verhältnis zwischen einem Signal/Rausch-Verhältnis des optischen Eingangssignals und einem Signal/Rausch-Verhältnis eines optischen Signals in einem Sensor mit dem niedrigsten Signal/Rausch-Verhältnis.

[0032] Normalerweise wird in einem Verfahren zur Optimierung einer Gruppe von optischen Sensoren eine Gruppe von optischen Sensoren bereitgestellt, die durch eine Vielzahl von Kopplern mit einer optischen Faser gekoppelt sind. Ein optisches Signal, das in einer optischen Faser weitergeleitet wird, wird von einer Vielzahl von Verstärkern verstärkt, um die Dämpfungen in der Sensorgruppe zu kompensieren. Es werden Kopplungsfaktoren für die Koppler gewählt, und es werden Verstärkungen für die Verstärker gewählt, um eine Systemrauschzahl zu optimieren. Die Systemrauschzahl ist das Verhältnis zwischen einem Signal/Rausch-Verhältnis des optischen Eingangssignals und einem Signal/Rausch-Verhältnis eines optischen Signals in einem Sensor mit dem niedrigsten Signal/Rausch-Verhältnis.

[0033] Vorzugsweise umfaßt eine optische Sensorarchitektur eine Vielzahl von Sensoren, die ein optisches Eingangssignal empfangen und die gestörte optische Signale als Antwort auf einen erfaßten Parameter ausgeben. Mindestens eine optische Faser verteilt ein optisches Signal an jeden Sensor und führt ein gestörtes optisches Signal von jedem Sensor zurück. Eine Vielzahl optischer Verstärker, die an ausgewählten Positionen entlang der Länge der mindestens einen optischen Faser verteilt sind, um die Leistung des verteilten optischen Signals und der zurückgeführten gestörten optischen Signale auf gewählten Pegeln zu halten.

[0034] Wahlweise umfaßt eine optische Sensorgruppenarchitektur einen Verteilungsbuss, der ein optisches Eingangssignal empfängt und verteilt. Der Verteilungsbuss gibt ein Verteilungsbuspumpsignal weiter. Ein Rückführungsbuss empfängt eine Vielzahl von optischen Rückführungssignalen und stellt die optischen Rückführungssignale als Ausgangssignale bereit. Der Rückführungsbuss gibt ein Rückführungsbuspumpsignal weiter. Eine Vielzahl von Sprossen bzw. Stufen ist zwischen den Verteilungsbuss und den Rückführungsbuss gekoppelt. Jede der Sprossen umfaßt mindestens einen Sensor, der einen entsprechenden Teil des optischen Eingangssignals empfängt und der eines der optischen Rückführungssignale erzeugt. Eine Vielzahl von optischen Eingangsverstärkern im Verteilungsbuss spricht auf das Verteilungsbuspumpsignal an. Die optischen Eingangsverstärker verstärken das optische Eingangssignal und haben Verstärkungen, die das optische Eingangssignal auf einem gewählten Signalpegel für jede der Sprossen halten. Eine Vielzahl von optischen Ausgangsverstärkern im Rückführungsbuss sprechen auf das Rückführungsbuspumpsignal an. Die optischen Ausgangsverstärker verstärken die Rückführungssignale, die von den Sensoren in den Sprossen erzeugt werden, und haben Verstärkungen, die im wesentlichen den Größen der optischen Rückführungssignale entsprechen. Die Verstärkungen der Verstärker sind normalerweise größer, wenn sie mit größerer Pumpenergie gepumpt werden. Außerdem treten ebenfalls vorzugsweise das Verteilungsbuspumpsignal und das Rückführungsbuspumpsignal in jeweilige Enden des Verteilungsbusses und des Rückführungsbusses ein. Das Verteilungsbuspumpsignal kann ein ungleiches Pumpen der optischen Eingangsverstärker und Differenzen der entsprechenden Verstärkungen der optischen Eingangsverstärker bewirken. Das Rückführungsbuspumpsignal kann ein ungleiches Pumpen der optischen Ausgangsverstärker und Differenzen der entsprechenden Verstärkungen der optischen Ausgangsverstärker bewirken. Die optischen Eingangsverstärker, die optischen Ausgangsverstärker und die Sprossen sind so angeordnet, daß die Architektur eine Vielzahl von optischen Wegen bildet, die verschiedene Kombinationen von optischen Eingangsverstärkern und optischen Ausgangsverstärkern aufweisen, die entsprechende kumulative Verstärkungen haben. Die optischen Eingangsverstärker und die optischen Ausgangsverstärker haben Verstärkungen, die so gewählt sind, daß die Differenzen der kumulativen Verstärkungen zwischen den optischen Wegen reduziert werden, wodurch die Rauschzahl der Architektur reduziert wird. Die Verstärker sind vorzugsweise entlang der Busse positioniert, so daß die optischen Wege die gleiche Anzahl von Verstärkern aufweisen. Die entsprechenden Verstärkungen der Verstärker sind vorzugsweise so eingestellt, daß Dämpfungen in der optischen Sensorarchitektur kompensiert werden, um einen nahezu verlustlosen Durchgang entlang der Busse beizubehalten.

[0035] Normalerweise umfaßt ein Verfahren zur Reduzierung der Rauschzahl einer optischen Sensorarchitektur den Schritt: Bereitstellen eines Verteilungs- und eines Rückführungsbusses, durch die Pumpenergie weitergeleitet wird. Die Pumpenergie ermöglicht eine Verstärkung für die optischen Verstärker, die entlang des Verteilungs- und des Rückführungsbusses positioniert sind. Das Verfahren weist ferner den Schritt auf: Bereit-

stellen einer Vielzahl von Sprossen und einer Vielzahl von Kopplern. Die Koppler verbinden jede der Sprossen mit dem Verteilungs- und dem Rückführungsbuss. Jede der Sprossen umfaßt mindestens einen Sensor, der einen entsprechenden Teil eines optischen Eingangssignals empfängt, das in den Verteilungsbuss eingegeben wird. Die Sensoren erzeugen entsprechende optische Rückführungssignale, die in den Rückführungsbuss eintreten. Das Verfahren umfaßt ferner den Schritt: Wählen der Anzahl der Sprossen und der Anzahl der Sensoren in jeder Sprosse, um eine Gesamtanzahl der Sensoren bereitzustellen, die annähernd gleich einer gewünschten Anzahl der gesamten Sensoren ist. Die Anzahl der Sprossen und die Anzahl der Sensoren in den Sprossen werden so gewählt, daß die Rauschzahl der optischen Sensorarchitektur reduziert wird. In bestimmten Ausführungsformen gemäß der Erfindung werden die Anzahl der Sprossen und die Anzahl der Sensoren so gewählt, daß die Rauschzahl reduziert, aber nicht minimiert wird, so daß die Verteilungs- und Rückführungspumpleistungsanforderungen auch reduziert werden. Außerdem wird in bestimmten Ausführungsformen der Bruchteil des optischen Eingangssignals, der durch die Koppler im Verteilungsbuss in die Sprossen eingekoppelt wird, so gewählt, daß die Rauschzahl der optischen Sensorarchitektur für bestimmte Pegel des optischen Eingangssignals und des Verteilungs- und des Rückführungsbuspumpsignals reduziert wird.

[0036] Vorzugsweise umfaßt ein Verfahren zur Reduzierung der Rauschzahl einer optischen Sensorarchitektur den Schritt: Bereitstellen eines Verteilungs- und eines Rückführungsbusses, durch die Pumpenergie weitergeleitet wird. Die Pumpenergie ermöglicht den optischen Verstärker, die entlang des Verteilungs- und des Rückführungsbusses positioniert sind, eine Verstärkung. Das Verfahren umfaßt ferner den Schritt: Bereitstellen einer Vielzahl von Sprossen und einer Vielzahl von Kopplern. Die Koppler verbinden jede der Sprossen mit dem Verteilungs- und dem Rückführungsbuss. Jede der Sprossen umfaßt mindestens einen Sensor, der einen entsprechenden Teil eines optischen Eingangssignals empfängt, das in den Verteilungsbuss eingegeben wird. Die Sensoren erzeugen entsprechende optische Rückführungssignale, die in den Rückführungsbuss eintreten. Das Verfahren umfaßt ferner den Schritt: Wählen entsprechender Bruchteile der optischen Eingangssignale, die durch die Koppler im Verteilungsbuss in die Sprossen eingekoppelt werden, und entsprechender Bruchteile der optischen Rückführungssignale, die durch die Koppler im Rückführungsbuss in den Rückführungsbuss eingekoppelt werden, um die Rauschzahl der optischen Sensorarchitektur für eine Gesamtanzahl der Sensoren zu reduzieren, die annähernd einer gewünschten Anzahl der gesamten Sensoren entspricht.

[0037] Wahlweise umfaßt eine optische Sensorarchitektur einen Verteilungsbuss und einen Rückführungsbuss, die beide Pumpenergie weiterleiten. Die Pumpenergie ermöglicht den optischen Verstärkern, die entlang des Verteilungs- und des Rückführungsbusses positioniert sind, eine Verstärkung. Die Architektur weist eine Vielzahl von Sprossen und eine Vielzahl von Kopplern auf. Die Koppler verbinden jede der Sprossen mit dem Verteilungs- und dem Rückführungsbuss. Jede der Sprossen umfaßt mindestens einen Sensor, der einen entsprechenden Teil des optischen Eingangssignals empfängt, das in den Verteilungsbuss eingegeben wird. Die Sensoren erzeugen entsprechende optische Rückführungssignale, die in den Rückführungsbuss eintreten. Die Anzahl der Sprossen und die Anzahl der Sensoren jeder Sprosse stellen eine Gesamtanzahl der Sensoren dar, die annähernd einer gewünschten Anzahl der gesamten Sensoren entspricht. Die Anzahl der Sprossen und die Anzahl der Sensoren in den Sprossen werden so gewählt, daß die Rauschzahl der optischen Sensorarchitektur reduziert wird.

[0038] Normalerweise umfaßt eine optische Sensorarchitektur einen Verteilungsbuss und einen Rückführungsbuss, die beide Pumpenergie weiterleiten. Die Pumpenergie ermöglicht den optischen Verstärkern, die entlang des Verteilungs- und Rückführungsbusses positioniert sind, eine Verstärkung. Eine Vielzahl von Sprossen und eine Vielzahl von Kopplern verbinden jede der Sprossen mit dem Verteilungs- und dem Rückführungsbuss, jede der Sprossen umfaßt mindestens einen Sensor, der einen entsprechenden Teil eines optischen Eingangssignals empfängt, der in den Verteilungsbuss eingegeben wird. Die Sensoren erzeugen entsprechende Rückführungssignale, die in den Rückführungsbuss eintreten. Die entsprechenden Bruchteile der optischen Eingangssignale, die durch die Koppler im Verteilungsbuss in die Sprossen eingekoppelt werden, und die entsprechenden Bruchteile der optischen Rückführungssignale, die durch die Koppler im Rückführungsbuss in den Rückführungsbuss eingekoppelt werden, werden so gewählt, daß die Rauschzahl der optischen Sensorarchitektur für eine Gesamtanzahl der Sensoren reduziert wird, die annähernd einer gewünschten Anzahl der gesamten Sensoren entspricht.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0039] **Fig. 1** stellt eine passive Gruppe von Sensoren ohne Verstärkung dar.

[0040] **Fig. 2** stellt eine verstärkte Sensorgruppe in einer Koppler-Verstärker-Konfiguration als einen ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung dar.

[0041] **Fig. 3** stellt eine verstärkte Sensorgruppe in einer Verstärker-Koppler-Konfiguration dar, wie unter einem zweiten Aspekt der vorliegenden Erfindung beschrieben.

[0042] **Fig. 4a** stellt die optimalen Verteilungsbuskopplungsfaktoren für eine passive Sensorgruppe und verstärkte Sensorgruppen sowohl für die Koppler-Verstärker-Konfiguration als auch für die Verstärker-Kopp-

ler-Konfiguration bei einem Sensor pro Sprosse dar.

[0043] **Fig. 4b** stellt die Rauschzahl des schlechtesten Sensors dar, wenn die Anzahl der Sensoren sowohl für passive als auch für verstärkte Sensorgruppen zunimmt, wobei bei der verstärkten Sensorgruppe alle Sensoren nominell die gleichen Rauschzahlen haben.

[0044] **Fig. 5a** stellt eine verstärkte Sensorgruppe entsprechend einem dritten Aspekt der vorliegenden Erfindung mit mehreren Sensoren in einer Untergruppe und in einer Koppler-Verstärker-Konfiguration dar, die einen Sternfaserkopplers verwendet, um Signale in jeder Untergruppe zu verteilen.

[0045] **Fig. 5b** stellt eine verstärkte Sensorgruppe wie in **Fig. 5a** dar, wobei ein Verteilungsbuss und ein Rückführungsbuss in jeder Untergruppe vorgesehen ist.

[0046] **Fig. 6a** stellt die Rauschzahl für den schlechtesten Sensor bei der in **Fig. 5a** dargestellten Sensorgruppe für verschiedene Verteilungsbuskopplungsfaktoren und für verschiedene Anzahlen von Sensoren in der Sensoruntergruppe und in einer Verstärker-Koppler-Konfiguration dar, die 100 Sensoren lang ist, wobei alle Sensoren nominell die gleichen Rauschzahlen haben.

[0047] **Fig. 6b** stellt die Rauschzahl für den schlechtesten Sensor bei der in **Fig. 5a** dargestellten Sensorgruppe für verschiedene Verteilungsbuskopplungsfaktoren und für verschiedene Anzahlen von Sensoren in der Sensoruntergruppe und in einer Koppler-Verstärker-Konfiguration dar, die 100 Sensoren lang ist, wobei alle Sensoren nominell die gleichen Rauschzahlen haben.

[0048] **Fig. 6c** stellt die Rauschzahl für den schlechtesten Sensor bei der Sensorgruppe für verschiedene Rückführungsbuskopplungsfaktoren und verschiedene Anzahlen von Sensoren in der Untergruppe dar.

[0049] **Fig. 7a** stellt die Auswirkung der Sensordämpfung auf die Systemrauschzahlen für passive und verstärkte Sensorgruppen von 100 Sensoren mit einem Sensor pro Untergruppe und einem Rückführungsbuskopplungsfaktor von 0,5 dar.

[0050] **Fig. 7b** stellt die Auswirkung der Spleiß- und der Kopplereinfügungsdämpfung auf die Systemrauschzahl bei passiven und verstärkten Sensorgruppen von 100 Sensoren dar.

[0051] **Fig. 8** stellt ein Zeitdiagramm des Erfassungssignals und des Rückführungssignals unter Verwendung von Zeitmultiplexierung dar.

[0052] **Fig. 9** stellt eine Sensorgruppe mit bidirektionalen Sensoren und einem bidirektionalen Bus dar, der sowohl als Verteilungsbuss als auch als Rückführungsbuss fungiert.

[0053] **Fig. 10** stellt eine als Entwurf ausgeführte verstärkte Sensorgruppe mit Zeitmultiplexierung dar.

[0054] **Fig. 11** stellt eine als Entwurf ausgeführte verstärkte Sensorgruppe dar, bei der mehrere Sensoren (z. B. vier) in jeder Sprosse unter Verwendung von zwei 1xj-Sternkopplern multiplexiert sind.

[0055] **Fig. 12** stellt die Rauschzahl gegen die Anzahl von Sensoren pro Sprosse für Sensorgruppen von insgesamt 60, 120, 250 und 320 Sensoren pro Faserpaar mit folgenden Parameterwerten dar: $C_d = 80\%$, $C_r = 50\%$, $L_s = 5$ dB und $L_x = 0,4$ dB.

[0056] **Fig. 13** stellt in einer unteren Kurve eine optimale Anzahl von Sensoren pro Sprosse gegen die Gesamtanzahl von Sensoren in einer Sensorgruppe dar, um die Rauschzahl zu minimieren (die von der Ortskurve der Minima in **Fig. 12** abgeleitet ist) und stellt in einer oberen Kurve eine optimale Anzahl von Sprossen pro Sensorgruppe (oder als Äquivalent die optimale Anzahl von Verstärker pro Bus) gegen die Gesamtanzahl von Sensoren pro Sensorgruppe dar.

[0057] **Fig. 14** stellt in einer oberen Kurve die Rauschzahl (NF) gegen den Verteilungsbuskopplungsfaktor C_d und den Rückführungsbuskopplungsfaktor C_r für eine Sensorgruppe von 200 Sensoren dar, wobei NF gegen C_r bei $C_d = 80\%$ und $j = 10$ durch eine gestrichelte Kurve dargestellt ist und wobei NF gegen C_d bei $C_r = 50\%$ durch eine durchgezogene Kurve dargestellt ist, und stellt in einer unteren durchgezogenen Kurve eine optimale Anzahl von Sensoren pro Sprosse dar, die NF bei einem bestimmten C_d minimiert.

[0058] **Fig. 15** stellt die Rauschzahl gegen die Gesamtanzahl der Sensoren für eine optimierte verstärkte Sensorgruppe (durchgezogene Kurve) und für eine optimierte passive Sensorgruppe (gestrichelte Kurve) dar.

[0059] **Fig. 16** stellt eine als Entwurf ausgeführte verstärkte Sensorgruppe mit Zeitmultiplexierung dar, wobei mehrere Sensoren in jeder Sprosse multiplexiert werden.

[0060] **Fig. 17** stellt ein Detail der einzelnen Sprosse mit Verstärkern aus **Fig. 16** dar und zeigt signifikante Dämpfungsmechanismen für die Pumpleistung.

[0061] **Fig. 18** stellt die Verstärkung eines einzelnen kurzen erbiumdotierten Faserverstärkers (EDFA) gegen die Pumpleistung bei verschiedenen Eingangssignalleistungen in einem in Betracht kommenden Bereich für Eingangspumpleistungen dar, die an einem oberen Ende durch nichtlineare Fasereffekte begrenzt sind und an einem unteren Ende durch die Minimierung der Differenz der Verstärkung in der Sensorgruppe begrenzt sind.

[0062] **Fig. 19** stellt die Pumpleistung, die in einer einzelnen Verstärkerstufe verbraucht wird, gegen einfallende Pumpleistung dar, wobei der Kopplerzusatzdämpfung, der Spleißeinfügungsdämpfung und der Faserdurchgangsdämpfung alle proportional zur einfallenden Pumpleistung sind und der Kopplerdämpfung normalerweise dominiert.

[0063] **Fig. 20** stellt den Gesamtpumpleistungsverlust bei durchschnittlichen Eingangssignalleistungen von 0 mW, 1 mW, 5 mW und 10 mW, wobei die Kopplerdämpfung zum Vergleich dargestellt ist.

[0064] **Fig. 21** stellt die Pumpleistung dar, die an jedem Verstärker bei einer Sensorgruppe mit 13 Verstärkern pro Bus und 15 Sensoren pro Sprosse (d. h. 195 Sensoren insgesamt) einfällt, wobei die Parameterwerte $C_d = 80\%$, $C_r = 50\%$, $L_s = 5$ dB und $L_x = 0,4$ dB sind und die Eingangspumpleistung so gewählt ist, daß am letzten Verstärker 100 mW einfallen.

[0065] **Fig. 22** stellt das Signal/Rausch-Verhältnis gegen die Sensoranzahl bei einer Sensorgruppe in **Fig. 21** dar.

[0066] **Fig. 23a** stellt eine Sensorgruppe mit einer verstärkten Vorwärtskopplungstopologie dar, die die Tendenz hat, der Signalleistung, die von allen Sensoren zurückgeführt wird, auf Kosten einer zusätzlichen Busfaser und von Busverzögerungsleitungen in einem Bus zu entzerren.

[0067] **Fig. 23b** stellt eine Sensorgruppe dar, die auch die Tendenz hat, die Signalleistung, die von allen Sensoren zurückgeführt wird, zu entzerren, wobei am Ende jedes Busses Bragg-Gitter hinzugefügt sind, um ungenutzte Pumpleistung zu reflektieren.

[0068] **Fig. 24** stellt das Signal/Rausch-Verhältnis gegen die Sensoranzahl bei der Vorwärtskopplungstopologie dar.

[0069] **Fig. 25** stellt eine als Entwurf ausgeführte verstärkte Sensorgruppe wie in **Fig. 16** dar, wobei ein bid-vektionales Pumpen der Verstärker den Bereich der einfallenden Pumpleistung in jedem Verstärker in der Sensorgruppe reduzieren soll, um die Signalleistungen, die von allen Sensoren zurückgeführt werden, zu entzerren.

[0070] **Fig. 26** stellt die Rauschzahl und die Verteilungsbuseingangspumpleistungsanforderung gegen den Verteilungsbuskopplungsfaktor für Anordnungen mit 10, 13, 17 und 20 Verstärkern pro Bus und entsprechend 20, 15, 12, 10 Sensoren pro Sprosse dar (d. h. $N \approx$ insgesamt 200 Sensoren pro Sensorgruppe) und bei einem Rückführungsbuskopplungsfaktor, der auf 50% festgelegt ist.

[0071] **Fig. 27** stellt die Rauschzahl gegen die Pumpleistung dar, wobei die Kurven aus **Fig. 26** abgeleitet sind, wobei C_d entlang der einzelnen Kurven variiert, während j und n konstant gehalten werden.

[0072] **Fig. 28** stellt die Rückführungsbuseingangspumpleistungsanforderung gegen den Rückführungsbuskopplungsfaktor für Sensorgruppen mit 10, 13, 17 und 20 Verstärkern pro Bus und entsprechend 20, 15, 12, 10 Sensoren pro Sprosse dar (d. h. \approx insgesamt 200 Sensoren pro Sensorgruppe), wobei der Verteilungsbuskopplungsfaktor so festgelegt ist, daß $NF = 40$ dB, wenn $C_r = 50\%$.

[0073] **Fig. 29** stellt eine Anwendung der Erfindung dar, bei der ein trockenes Ende, das optische Quellen und einen Empfänger umfaßt, an Land oder an Bord eines Wasserfahrzeugs ist, und bei der ein nasser Endabschnitt, der die Sensorgruppe umfaßt, unter Wasser ist.

[0074] **Fig. 30** stellt eine Hydrophonanordnung mit 1000 Sensoren dar, die jeweils in vier Gruppen von 250 Sensoren angeordnet sind.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0075] Passive Sensorgruppen können so ausgeführt sein, daß sie eine Zeitmultiplexierung (TDM) von Signalen durchführen, indem die passive Sensorgruppe **10** so angeordnet ist, wie in **Fig. 1** gezeigt. Ein Verteilungsbus **100** transportiert ein Ermittlungssignal von einer bekannten Quelle entlang seiner Länge. Der Verteilungsbus **100** ist mit einer Anzahl von Kopplern **140** verbunden, die das Erfassungssignal vom Verteilungsbus **100** in eine Anzahl von Sensoren **110** einkoppeln, die in festen Abständen entlang der Länge des Verteilungsbusses **100** angeordnet sind. Jeder Koppler **140** koppelt das Erfassungssignal vom Verteilungsbus **100** teilweise in ein erstes Ende jedes Sensors **110** ein. Jeder Sensor **110** modifiziert das Erfassungssignal auf der Grundlage von externen Störungen (nicht dargestellt), z. B. von akustischen Signalen, die bei einer seismischen Forschungsaktivität erfaßt werden. Ein zweites Ende jedes Sensors **110** ist mit einem Rückführungsbus **120** über einen Koppler **142** verbunden. Der Rückführungsbus **120** empfängt somit das modifizierte Signal vom optischen Sensor **110** und überträgt es an den Detektor außerhalb der Sensorgruppe (nicht dargestellt). Wegen der leiterartigen Form der Sensorgruppe **10** wird jeder Weg vom Verteilungsbus **100** über einen Sensor **110** zum Rückführungsbus **120** häufig als Sprosse bezeichnet.

[0076] Da die Strecke, die das Signal durch die Sensorgruppe laufen muß, davon abhängt, in welchem Sensor das Signal eingekoppelt wird, wird das modifizierte Signal, das von den Sensoren **110** ausgegeben wird, in verschiedenen Zeitintervallen, die von der Strecke zwischen dem Sensor **110** und der Quelle abhängen, auf den Rückführungsbus **120** gelegt. Sensoren, die näher an der Quelle sind, geben das modifizierte Signal zu einem früheren Zeitpunkt an den Prozessor zurück als diejenigen Sensoren, die entlang des Verteilungsbusses **100** weiter entfernt liegen. Auf diese Weise werden die Signale von den optischen Sensoren auf dem Rückführungsbus **120** zeitmultiplexiert. Der Detektor empfängt die modifizierten Signale sequentiell in Zeitintervallen, die durch die Länge des Quellenimpulses, die Wiederholungsrate des Impulses und die optische Strecke zwischen jeweiligen Sensoren bestimmt werden.

[0077] In einer passiven Sensorgruppe erfährt das SNR eine signifikante Verschlechterung, da die Anzahl der Sensoren in der Gruppe zunimmt. **Fig. 4b** zeigt, daß der Rauschzahlpegel bei passiven Sensorgruppen mit

der Anzahl der Sensoren in der Sensorgruppe monoton zunimmt. Der Grund dafür ist, daß jeder jeweils nachfolgende Sensorkoppler das Quellensignal schwächt, bevor es zur nächsten Kopplung läuft. Wenn der Kopplungsfaktor 0,1 ist, dann werden 10% des Quellensignals in den ersten Sensor eingekoppelt, und 90% des Signals werden an den nächsten Sensor weitergegeben. Der zweite Koppler in der Serie koppelt 10% des verbleibenden Signals in den zweiten Sensor ein, was nur 9% des ursprünglichen Signals ist und gibt 90% des verbleibenden Signals an den nächsten Sensor weiter, was nur 81% des ursprünglichen Signals ist. Die Leistung, die in späteren Stufen der Sensorgruppe an die Sensoren weitergegeben wird, verschlechtert sich also deutlich gegenüber ihrer ursprünglichen Signalstärke. Wenn also der Kopplungsfaktor 0,1 wäre, dann würde der hundertste Sensor ein Erfassungssignal empfangen, das nur $0,9^{99} \times 0,1$ (d. h. 0,0003%) der ursprünglichen Stärke des Erfassungssignals ist. Ferner ist die Leistung, die an den Detektor zurückgegeben wird, nur $(0,9^{99} \times 0,1)^2$ (d. h. 0,0000000009%) der ursprünglichen Stärke des Erfassungssignals (wenn man annimmt, daß im Sensor keine Dämpfung auftritt).

[0078] **Fig. 2** zeigt einen ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung als Sensorgruppe **12** in einer Koppler-Verstärker-Konfiguration, bei der eine Verschlechterung des SNR durch die Verwendung von erbiumdotierten Faserverstärkern (EDFA) **130**, **132** verhindert wird. Die EDFAs **130**, **132** regenerieren die optischen Signale periodisch, während sie durch die Sensorgruppe laufen. Die EDFAs **130**, **132** werden hergestellt, indem ein Teil einer erbiumdotierten Faser in den Verteilungs- und in den Rückführungsbus gespleißt wird. Unter Verwendung von Verstärkerpumpasern kann die erbiumdotierte Faser als optischer Verstärker fungieren. Jede Anzahl von verschiedenen Typen von faseroptischen Wellenleiterverstärkern kann ebenfalls verwendet werden. Eine Yb : Er : Glasfaser und Nd-dotierte LiNbO₃-Wellenleiter sind unter den vielen Typen von optischen Verstärkern, die anstelle der erbiumdotierten Faserverstärker vorteilhaft in der vorliegenden Erfindung verwendet werden können.

[0079] Im Idealfall müßte die Er-dotierte Faser von beiden Enden jedes Busses (d. h. des Verteilungsbusses **100** und des Rückführungsbusses **120**) mit einer Wellenlänge von 1480 nm gepumpt werden. Insbesondere ist ein erster Pumplaser **102** mit einem ersten Ende des Verteilungsbusses **100** gekoppelt, so daß im wesentlichen das gesamte Pumplicht in den Verteilungsbus **100** eingekoppelt wird, um sich in einer Vorwärtsrichtung entlang des Verteilungsbusses **100** auszubreiten. Ein zweiter Pumplaser **104** ist mit dem entgegengesetzten Ende des Verteilungsbusses **100** gekoppelt, so daß sich das Pumplicht vom zweiten Pumplaser **104** in der entgegengesetzten Richtung durch den Verteilungsbus **100** ausbreitet. Der Verteilungsbus **100** transportiert ein optisches Signal, das aus einer Signalquelle **106** entlang ihrer Länge ausgekoppelt ist. Die Signalquelle **106** ist mit dem Verteilungsbus über einen Wellenlängenmultiplexierer **108** gekoppelt. In der dargestellten Ausführungsform ist der Wellenlängenmultiplexierer **108** so gewählt, daß im wesentlichen das gesamte Signallicht aus der Signalquelle **106** in den Verteilungsbus **100** eingekoppelt wird. Wie dem Fachmann bekannt ist, wird im wesentlichen kein Licht aus der Pumpquelle **102** vom Wellenlängenmultiplexierer **108** ausgekoppelt, so daß das Pumplicht im Verteilungsbus **100** verbleibt.

[0080] Der Verteilungsbus **100** ist mit den Kopplern **140** verbunden, die den Verteilungsbus **100** mit einer Anzahl von Sensoren **110** koppeln, die in festen Intervallen entlang der Länge des Verteilungsbusses **100** angeordnet sind. Der Verteilungsbus ist auch mit einer Anzahl von erbiumdotierten Faserverstärkern **130** verbunden, die entlang des Verteilungsbusses **100** angeordnet sind und sich direkt nach jedem der Koppler **140** befinden. Jeder Koppler **140** koppelt das Erfassungssignal teilweise aus dem Verteilungsbus **100** in ein erstes Ende jedes Sensors **110** ein. Die Kopplungsfaktoren sind normalerweise bei einer optimierten praktischen verstärkten Sensorgruppe viel größer als bei einer optimierten praktischen passiven Sensorgruppe. Jeder Sensor **110** modifiziert dann das Signal auf der Grundlage eines externen Eingangssignals (z. B. akustische Signale, nicht dargestellt).

[0081] Jeder der Koppler **142** koppelt ein zweites Ende jedes Sensors **110** mit dem Rückführungsbus **120**, der das modifizierte Signal vom Sensor **110** empfängt und es an einen Detektor **126** außerhalb der Sensorgruppe zurückgibt. Die Rückführungsbussignale werden von Verstärkern **132** verstärkt, um die Signalteilung durch die Rückführungskoppler **142** zu kompensieren. Die Verstärker **132** empfangen Pumpleistung von einem dritten Pumplaser **122**, der Pumplicht in ein erstes Ende des Rückführungsbusses **120** einkoppelt, das sich in einer ersten Richtung im Rückführungsbus **120** ausbreiten soll, und von einem vierten Pumplaser **124**, der Licht in das entgegengesetzte Ende des Rückführungsbusses **120** einkoppelt, das sich in der entgegengesetzten Richtung des Lichts von der dritten Pumpquelle **124** ausbreiten soll. Der Detektor **126** ist mit dem Rückführungsbus **120** nahe dem ersten Ende durch einen Wellenlängenmultiplexierer **128** gekoppelt, der Licht mit einer Signalwellenlänge vom Rückführungsbus **120** in den Detektor **126** einkoppelt, der aber kein Licht mit der Pumpwellenlänge einkoppelt.

[0082] In einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung sind die Signalkoppler **140**, **142**, die das optische Signal in entsprechende Sensoren einkoppeln oder aus entsprechenden Sensoren auskoppeln, Wellenlängenmultiplexierer. Wellenlängenmultiplexierer sind so aufgebaut, daß nur vorgewählte Wellenlängen in die Sensoren eingekoppelt werden. Licht mit einer Wellenlänge, die nicht eine der vorgewählten Wellenlängen ist, wird nicht eingekoppelt und wird durch den Wellenlängenmultiplexierer durchgelassen. Durch Vorwäh-

len der Signalwellenlänge als zu koppelnde Wellenlänge ist die vorliegende Erfindung in der Lage, nur das optische Signal in die Sensoren einzukoppeln, so daß das Verstärkerpumplicht angekoppelt durch den Multiplexer durchgelassen wird. Dadurch wird eine signifikante Verschlechterung des Verstärkerpumplichts verhindert, während es sich entlang des Verteilungsbusses ausbreitet.

[0083] Wenn das Quellensignal durch den ersten Koppler **140** zum ersten optischen Sensor **110** läuft, wird das Signal, das im Verteilungsbus **100** verbleibt, von einem der EDFAs **130** verstärkt, der eine Verstärkung hat, die so gewählt ist, daß die Leistung des optischen Signals so erhöht wird, daß sie wieder annähernd der Leistung (z. B. 90–110%) des ursprünglichen optischen Signals entspricht. Die Verstärkung des EDFA **130** wird so gewählt, daß der Signalleistungsverlust, der durch das unmittelbar vorhergehende Koppeln und die externen Dämpfungen bewirkt wird, im wesentlichen kompensiert wird. Das Signal wird nacheinander durch Koppler **140** und optische Verstärker **130** abwechselnd gekoppelt und verstärkt, während das Signal entlang der Länge des Verteilungsbusses **100** weiterläuft. Auf diese Weise läuft der Eingangsimpuls entlang des Verteilungsbusses **100**, wobei Leistung in jeder Stufe gewonnen wird und verlorengeht, während ein minimaler Gesamtgewinn oder Gesamtverlust realisiert wird. Eine ähnliche Konfiguration ist im Rückführungsbus vorgesehen. Diese Konfiguration, die in **Fig. 2** gezeigt ist, wird als Koppler-Verstärker-Konfiguration bezeichnet.

[0084] Die vorliegende Erfindung vermeidet das Signalverschlechterungsproblem, das in der passiven Sensorgruppe in **Fig. 1** vorherrscht. Jeder Sensor **110** empfängt ein Quellensignal im wesentlichen mit der gleichen Leistung, obwohl der Sensor **110** weit entfernt auf dem Verteilungsbus **100** sein kann und das Signal vieler vorheriger Sensorkopplungen unterzogen worden sein kann. Die vorliegende Erfindung ermöglicht es also, den Leistungspegel des optischen Signals auf einem beherrschbaren Pegel zu halten, um dadurch Nichtlinearitätseffekte in der Faser zu vermeiden, die auftreten, wenn sich die optischen Leistungen in der Faser erhöhen.

[0085] Ein zweiter Aspekt der vorliegenden Erfindung ist eine Sensorgruppe **14**, wie in **Fig. 3** gezeigt. In dieser Ausführungsform sind EDFAs **130** entlang der Länge des Verteilungsbusses **100** eingefügt, wie in **Fig. 2**, sind jedoch vor den Kopplern **140** angeordnet, so daß das Quellensignal verstärkt wird, bevor die Koppeldämpfungen auftreten. Die Verstärkung jedes Verstärkers **130** ist so festgelegt, daß der erwartete Signalleistungsverlust im Koppler **140**, der dem Verstärker **130** folgt, kompensiert wird. In dieser Konfiguration erfährt das optische Signal eine Verstärkung vor dem Verlust, was die Rauschcharakteristik und die optimalen Werte für den Kopplungsfaktor ändert. Diese Konfiguration wird als Verstärker-Koppler-Konfiguration bezeichnet.

[0086] **Fig. 4a** zeigt die optimalen Verteilungsbuskopplungsfaktoren bei den passiven und den verstärkten Sensorgruppen sowohl in der Koppler-Verstärker-Konfiguration als auch in der Verstärker-Koppler-Konfiguration bei einem Sensor pro Sprosse und bei 100 Sprossen pro Sensorgruppe (d. h. insgesamt 100 Sensoren in der Sensorgruppe). Die Sensorgruppen, die in **Fig. 4a** gezeigt sind, haben eine Dämpfung $L_x = 0,2$ dB und eine Sensordämpfung $L_s = 6$ dB. Die verstärkte Sensorgruppe verwendet ein Verteilungsbuskopplungsfaktor, der so optimiert ist, daß die Rauschzahl reduziert wird, und ein Rückführungsbuskopplungsfaktor von 3 dB. **Fig. 4a** zeigt, daß bei den verstärkten Sensorgruppen, die in **Fig. 2** und **3** gezeigt sind, ein optimaler Kopplungsfaktor für die Koppler im Verteilungsbus besteht und daß, wenn die Anzahl der Sensoren zunimmt, die optimale Verteilungsbuskopplung sowohl bei der Koppler-Verstärker-Konfiguration als auch bei der Verstärker-Koppler-Konfiguration reduziert wird.

[0087] **Fig. 4b** zeigt, daß beide verstärkte Sensorgruppen-Konfigurationen die gleiche Rauschzahlabhängigkeit aufweisen, sich schnell auf Rauschzahlen von 30 dB steigern, sich dann von da an langsam steigern, wobei sie nur 44 dB erreichen, wenn N gleich 200 Sensoren ist. Im Vergleich dazu nimmt die passive Sensorgruppenrauschzahl (dargestellt in Gleichung 5) im gesamten in Betracht kommenden Bereich weit schneller zu, was zu einem unzulässig hohen Rauschzahlpegel von 140 dB bei 200 Sensoren führt. Bei großen Sensorgruppen (100 und mehr Sensoren) stellt die verstärkte Sensorgruppe eine große Verbesserung des SNR gegenüber einer normalen passiven Sensorgruppe dar. Wenn eine Rauschzahl von nicht mehr als beispielsweise 40 dB akzeptabel ist, kann die optimierte passive Sensorgruppe nur etwa 12 Sensoren haben, während die verstärkte Sensorgruppe immerhin 100 Sensoren aufnehmen kann, d. h. nahezu zehnmal soviel wie in der passiven Sensorgruppe bei der gleichen Rauschzahl.

[0088] Unter einem dritten Aspekt der vorliegenden Erfindung ist der einzelne Sensor **110** zwischen jedem Paar von Kopplern **140**, **142**, die in **Fig. 2** und **3** gezeigt sind, ersetzt durch eine Untergruppe von Sensoren, wie in einer Sensorgruppe **16** in **Fig. 5a** gezeigt. Wie oben beschrieben, empfängt ein Verteilungsbus **100** ein Signal von der externen Quelle und transportiert es entlang seiner Länge. Ein Teil des Signals wird vom Koppler **140** wie in den oben beschriebenen Konfigurationen verteilt. Ein Sternfaserkoppler **150** koppelt jedoch dann einen entsprechenden gleichen Bruchteil des Signals in jeden Sensor **110** der Untergruppe **160** ein, die eine passive Sensorgruppe mit einer kleinen Anzahl von Sensoren **110** ist. Der Sternfaserkoppler **150** verteilt das Erfassungssignal gleichmäßig unter den Sensoren in der Untergruppe. Die Signale, die vom Sternfaserkoppler **150** verteilt werden, laufen durch die entsprechenden der Sensoren **110** und werden durch einen anderen Sternfaserkoppler **152** und den Koppler **142** wieder in den Rückführungsbus **120** eingekoppelt. Indem eine andere Länge für jede der Fasern in der Untergruppe **160** gewählt wird, ist die Länge jedes Signalwegs durch die

Untergruppe **160** einheitlich. Dadurch wird verhindert, daß sich Impulse von jedem der Sensoren **110** in der Untergruppe **160** zeitlich im Rückführbus **120** überschneiden, wenn Zeitmultiplexierung verwendet wird. Außerdem muß die Gesamtweglänge vom letzten Sensor in einer Untergruppe kleiner sein als die Gesamtweglänge des ersten Sensors in der nächsten Untergruppe. Dadurch wird verhindert, daß zwei Sensoren die gleiche Gesamtweglänge haben und sich im Rückführbus zeitlich überschneiden.

[0089] Wenn die gestörten Signale im Rückführbus **120** sind, durchlaufen sie den Gewinn-Verlust-Zyklus, bis sie den Detektor und eine Verarbeitungsvorrichtung (nicht dargestellt) erreichen. Dieser Aspekt der vorliegenden Erfindung hat den Vorteil, daß die Anzahl der Verstärker, die in der Sensorgruppe notwendig ist, reduziert wird. Zusätzliche Vorteile sind u. a. geringere Pumpleistungsanforderungen und ein besseres Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) bis zu einem bestimmten Punkt und die Fähigkeit, Sensorgruppen mit bis zu 400 Sensoren zu unterstützen.

[0090] **Fig. 5b** stellt eine alternative Ausführungsform zu **Fig. 5a** dar, bei der die Sternfaserkoppler **150**, **152** durch einen Verteilungsbus **170** und einen Rückführbus **172** in jeder Untergruppe ersetzt sind, die mit den Sensoren **110** über entsprechende Verteilungskoppler **174** und Rückführungskoppler **176** gekoppelt sind. Es versteht sich, daß Kombinationen aus Sternkopplern und einem Rückführbus oder einem Verteilungsbus und Sternkopplern ebenfalls verwendet werden können, um in die Sensoren in den Untergruppen einkoppeln oder aus diesen auskoppeln zu können.

[0091] **Fig. 6a** stellt die Auswirkung der Änderung des Kopplungsfaktors und der Anzahl der Sensoren in jeder Untergruppe in der Verstärker-Koppler-Konfiguration bei der Systemrauschzahl für eine Sensorgruppe mit insgesamt 100 Sensoren dar. Für einen und zwei Sensoren pro Untergruppe gibt es einen optimalen Kopplungsfaktor, der die Rauschzahl minimiert. Für einen Sensor pro Untergruppe ist die minimale Rauschzahl 39 dB bei einem Kopplungsfaktor von 0,28. Wenn zwei oder vier Sensoren pro Untergruppe vorhanden sind, ist die Rauschzahl niedriger. In einer Konfiguration mit zwei Sensoren ist die Rauschzahl mindestens 38 dB, wenn der Kopplungsfaktor 0,55 ist. Dieses Ergebnis zeigt, daß durch Verwendung von zwei Sensoren pro Untergruppe anstelle eines Sensors der gleiche Rauschzahlpegel in einem System erreicht werden kann, das halb so viele Verstärker bei der gleichen Gesamtanzahl von Sensoren erfordert. Der Grund für diese Reduzierung der Rauschzahl ist eine Reduzierung des gesamten verstärkten Spontanemissions-(ASE-)Rauschens aufgrund einer Reduzierung der Anzahl der Verstärker bei einer äquivalenten Anzahl von Sensoren.

[0092] Wenn das Signal-ASE-Schwebungsrauschen anstelle des Schrotrauschens das SNR begrenzt, hat die Reduzierung der ermittelten Leistung keine starke Auswirkung auf das Ausgangs-SNR. Während zwei Sensoren pro Untergruppe doch zu niedrigeren ermittelten Leistungen (um ein Viertel niedriger) führen, reduzieren sie auch die Größe des Signal-ASE-Schwebungsrauschens, was eine geringfügig bessere Leistungsfähigkeit ergibt. **Fig. 6a** zeigt, daß bei vier Sensoren pro Untergruppe die Rauschzahl weiter verbessert wird, wenn sich der Kopplungsfaktor eins nähert. Bei einem hohen Kopplungsfaktor von 0,95 kann die Systemrauschzahl auf 36 dB gesenkt werden. Durch Verdopplung der Anzahl der Sensoren in der Untergruppe und durch Halbierung der Anzahl der Busverstärker und Koppler können die Gesamtanzahl der Komponenten und die Gesamtpumpleistungsanforderungen verringert werden, während die SNR-Systemleistungsfähigkeit beibehalten wird.

[0093] **Fig. 6b** zeigt die gleiche Analyse für die Koppler-Verstärker-Konfiguration. Wie oben ausgeführt, hängt der Wert des optimalen Kopplungsfaktors, nicht aber die Rauschzahl von der Anzahl der Sensoren in der Untergruppe ab. **Fig. 6b** zeigt, daß, wenn die Anzahl der Sensoren in der Untergruppe von eins bis zwei oder vier zunimmt, sich der Wert des optimalen Kopplungsfaktors von 0,2 zu 0,35 bzw. 0,55 ändert, während die Rauschzahl genau unter 40 dB bleibt.

[0094] Die Rückführbuskoppler **142** haben keinen optimalen Kopplungsfaktor, weisen aber bessere Ergebnisse bei höherer Kopplung auf, wie in **Fig. 6c** dargestellt. Der Rauschzahlpegel ist sowohl für die Verstärker-Koppler-Konfiguration als auch die Koppler-Verstärker-Konfiguration und für verschiedene Größen der Untergruppe dargestellt. Bei allen Konfigurationen ist der Verteilungsbuskopplungsfaktor optimiert, und die Gesamtanzahl der Sensoren ist 100. Wenn der Rückführbuskopplungsfaktor von 0,2 auf 0,95 erhöht wird, ist die Rauschzahlpegelverschlechterung bei beiden Konfigurationen, die in **Fig. 6c** gezeigt sind, und bei einem, zwei oder vier Sensoren pro Untergruppe kleiner als 1 dB. Die Rückführbuskopplung kann daher auf der Grundlage von Ermessensentscheidungen zu Verstärkerpumpenanforderungen frei gewählt werden (ein niedrigerer Kopplungsfaktor bedeutet eine niedrigere Pumpleistungsanforderung). Die Verteilung der Rauschzahlpegel bei verschiedenen Sensorgruppen-Konfigurationen ist ein Ergebnis des Wählens des optimalen Verteilungsbuskopplungsfaktors, wie in **Fig. 6a** gezeigt.

[0095] Im folgenden sind die Systemparameter definiert:

n = Anzahl der Untergruppen

j = Anzahl der Sensoren pro Untergruppe

n_j = Gesamtanzahl der Sensoren

C_d = Kopplungsfaktor für den Verteilungsbus (Koppler **140**)

C_r = Kopplungsfaktor für den Rückführbus (Koppler **142**)

L_x = Spleiß- und Einfügungsdämpfung in jedem Kopplersegment

L_s = Sensordämpfung

n_{sp} = Verstärkerinversionsparameter

[0096] Wegen des Vorhandenseins der optischen Verstärker **130** und **132**, die dem Signal eine verstärkte Spontanemission (ASE) hinzufügen, ist das Ausgangssignal der verstärkten Sensorgruppe nicht mehr schrotrauschbegrenzt wie bei der passiven Sensorgruppe, sondern Schrotrauschen und Signal-ASE-Schwebungsrauschen sind dominante Bedingungen. Um die Rauschzahl für den schlechtesten Sensor zu ermitteln, muß die Rauschzahlberechnung nun alle ASE von allen Verstärkern berücksichtigen.

[0097] Es wird angenommen, daß jeder Verstärker **130** im Verteilungsbuss identisch ist und die gleiche Verstärkung hat. Ebenso wird angenommen, daß die Verstärker **132** im Rückführungsbuss eine identische Verstärkung haben, wobei ein Inversionsparameter dem Inversionsparameter der Verstärker im Verteilungsbuss entspricht. Das Fernpumpen der Verstärker **130**, **132** von jedem Busende ermöglicht es zwar, daß sich das System diesem Zustand nähert, aber die Verstärker unterscheiden sich in der Praxis aufgrund der Herstellungstoleranzen und der ungleichmäßigen Pump- und Signalleistung geringfügig. Die Verstärkung wird so eingestellt, daß sie der Dämpfung im Bus entspricht, was zur folgenden Verstärkung bei den Verteilungsbussverstärkern **130** führt:

$$G_d = \frac{1}{L_x(1-C_d)} \quad (6)$$

und was zur folgender Verstärkung bei den Verstärkern **132** im Rückführungsbuss führt:

$$G_r = \frac{1}{L_x(1-C_r)} \quad (7)$$

[0098] Es wird angenommen, daß das Eingangssignal ein pulsierendes Signal ist und die Pumpe kontinuierlich eingeschaltet ist, was zu einer kontinuierlichen ASE führt. Obwohl die Weglänge für jeden Sensor **110** anders ist, kann die ASE, die einen Sensor **110** durchlaufen hat, die Rauschcharakteristik eines Signals von einem anderen Sensor **110** beeinflussen.

[0099] Wegen der starken Signalleistungen können das ASE-ASE-Schwebungsrauschen und das ASE-Schrotrauschen im Systementwurf vernachlässigt werden. Bei der Konfiguration, die in **Fig. 3** gezeigt ist, wo in beiden Bussen **100**, **120** ein Verstärker **130**, **132** vor dem ersten Koppler angeordnet ist, ist der Rauschzahlpegel wie folgt:

$$NF_{\text{amplifier-coupler}} = \frac{j^2 L_x^2 (1-C_r)(1-C_d)}{C_d C_r L_s} + \frac{j[1-(1-C_d)L_x]n(n+1)n_{sp}}{C_d C_r L_s} + \frac{2j^2 L_x n(1-C_d)[1-(1-C_r)L_x]n_{sp}}{C_d C_r L_s} \quad (8)$$

[0100] Man beachte, daß diese Formel für jeden Sensor **110** die gleiche ist, im Gegensatz zu der Formel der passiven Sensorgruppen-Konfiguration. Die Antwort jedes Sensors wird durch das Signal-ASE-Schwebungsrauschen gleichmäßig beeinflusst.

[0101] Die Gleichung 8 kann vorteilhaft verwendet werden, um bei einer erforderlichen Anzahl von Sensoren eine optimale Kombination aus der Anzahl von Sprossen und der Anzahl von Sensoren pro Sprosse zu wählen. Insbesondere werden ganzzahlige Werte für n (Anzahl der Untergruppen oder Sprossen) und j (Anzahl der Sensoren pro Untergruppe), deren Produkt nahe oder gleich der erforderlichen Anzahl von Sensoren ist, in die Gleichung 8 eingesetzt und der Wert des Rauschzahlpegels für jede Kombination berechnet. Die Kombination, die den niedrigsten Rauschzahlpegel hat, wird dann als optimale Kombination für die erforderliche Anzahl von Sensoren gewählt.

[0102] Unter Verwendung der gleichen Methode wie in der Gleichung 8 kann gezeigt werden, daß der Rauschzahlpegel für das Kopplerverstärkersystem nunmehr folgender ist:

$$NF_{\text{coupler-amplifier}} = \frac{j^2}{C_d C_r L_s} + \frac{j[1-(1-C_d)L_x]n(n-1)n_{sp}}{(1-C_d)L_x} + \frac{2j^2(n-1)[1-(1-C_r)L_x]n_{sp}}{C_d C_r L_s} \quad (9)$$

[0103] Um die verstärkte Sensorgruppenleistungsfähigkeit zu optimieren, ist es notwendig, die Auswirkung der Kopplungsfaktoren des Verteilungs- und Rückführungsbusses auf den Systemrauschzahlpegel zu prüfen,

wie es bei der passiven Sensorgruppe erfolgte. Die Gleichungen 8 und 9 zeigen, daß es keinen optimalen Kopplungsfaktor für den Rückführbus **120** gibt. Das System ist sehr intensiv in bezug auf die Wahl des C_r . Es besteht ein optimaler Kopplungsfaktor für die Koppler 140 im Verteilungsbuss, wie in **Fig. 4a** gezeigt. Die Zusatzdämpfung wurde so gewählt, daß sie 0,2 dB war, und die Sensordämpfung wurde so gewählt, daß sie 6 dB war, und der Verstärkerinversionsparameter n_{sp} wurde so gewählt, daß er 1,5 betrug. Es werden 3-dB-Koppler im Rückführbus **120** verwendet, wobei zwei Sensoren **110** in jeder Untergruppe sind. Da die Anzahl der Sensoren **110** in der Sensorgruppe zunimmt, sinkt bei beiden Konfigurationen die optimale Verteilungsbuskopplung C_d . Es kann nachgewiesen werden, daß sich bei großen Anzahlen von Sensoren bei einem Sensor pro Sprosse (ein Verstärker pro Bus pro Sensor) das optimale Kopplungsfaktor wie folgt nähert, und zwar bei der Verstärker-Koppler-Konfiguration:

$$C_{d(\text{amplifier-coupler})} = \frac{\sqrt{2[1-(1-C_r)L_s]}}{\sqrt{nC_rL_s}} \quad (10)$$

und bei der Koppler-Verstärker-Konfiguration:

$$C_{d(\text{coupler-amplifier})} = \frac{\sqrt{2[1-(1-C_r)L_x]L_x}}{\sqrt{nC_rL_s}} \quad (11)$$

[0104] In beiden Konfigurationen hängt der optimale Wert für C_d nicht nur von der Anzahl der Sensoren **110** im System, sondern auch von der Sensordämpfung, der Zusatzdämpfung, der Anzahl der Sensoren in der Untergruppe und der Verstärkerinversion ab. Beide optimalen Kopplungsfaktoren fallen ab mit $1/n^{1/2}$ im Vergleich zu annähernd $1/N$ bei der passiven Sensorgruppe in **Fig. 1**. Die Verstärker-Koppler-Konfiguration erfordert höhere optimale Kopplungsfaktoren, die sich bei niedrigen Anzahlen von Sensoren eins nähern. In der folgenden Analyse ist bei den Werten für n , bei denen vorhergesagt wird, daß der optimale Wert des C_d mit nahe eins ist, der Wert tatsächlich auf 0,95 begrenzt worden, da ein C_d , der zu nahe an eins ist, einen Verteilungsverstärker **130** mit einer unrealistisch hohen Verstärkung erfordern würde. Ebenso würde ein C_r , der zu nahe an eins ist, einen Rückführungsverstärker **132** mit einer unrealistisch hohen Verstärkung erfordern.

[0105] Die Sensordämpfungszahlen beeinflussen auch die optimalen Kopplungsfaktoren. In der oben beschriebenen Situation wurde die Sensordämpfung mit 6 dB angenommen. Diese wurde gewählt, um einer Dämpfung von 3 dB in einem unsymmetrischen Mach-Zehnder-Sensor und einer Faserkrümmungsdämpfung von 3 dB in einem Spulensensor Rechnung zu tragen. **Fig. 7a** demonstriert die Auswirkung der verschiedenen Sensordämpfungen auf die Rauschzahl des schlechtesten Sensors in der Sensorgruppe mit 100 Sensoren sowohl bei der passiven als auch bei der verstärkten Sensorgruppe. Sowohl die passive als auch die verstärkte Sensorgruppe erfährt eine Rauschzahlverschlechterung des Signals, wenn die Sensordämpfungen zunehmen. Über einen Sensordämpfungsbereich von 0 bis 15 dB verschlechtern sich die verstärkten Sensorgruppen höchstens um 8 dB, während sich die passive Sensorgruppe um 15 dB verschlechtert. Es gibt auch einen Vorteil für die Verstärker-Koppler-Sensorgruppen-Konfiguration gegenüber der Koppler-Verstärker-Konfiguration, wie in **Fig. 7a** gezeigt. Die beiden Konfigurationen beginnen mit einem Abstand von nur 0,3 dB, wenn die Sensordämpfung bei null liegt. Bei einer Sensordämpfung von 15 dB hat die Verstärker-Koppler-Konfiguration einen Rauschzahlpegel, der nahezu 2 dB unter der Koppler-Verstärker-Konfiguration liegt.

[0106] **Fig. 7b** zeigt die Auswirkung der Zusatzdämpfungen sowohl bei der passiven als auch bei der verstärkten Sensorgruppe in einer Gruppe von 100 Sensoren mit einem Sensor pro Untergruppe. Da die Zusatzdämpfung in den Bussen von 0 bis 1 dB pro Kopplersegment zunimmt, erfahren die verstärkten Sensorgruppen nur eine Rauschzahlpegelverschlechterung von 2 dB. Vorzugsweise wird in den verstärkten Sensorgruppen eine Extraverstärkung hinzugefügt, da eine Extradämpfung auftritt, so daß der Gewinn immer gleich dem Verlust ist. Der Rauschzahlpegel der passiven Sensorgruppe erhöht sich von 55 dB ohne Zusatzdämpfung auf immerhin 255 dB bei einer Spleiß- und Kopplerdämpfung von 1 dB. Dies zeigt die extreme Empfindlichkeit der passiven Sensorgruppe gegenüber Komponentendämpfungen, während die verstärkten Sensorgruppen ziemlich stabil bleiben, wenn Komponentendämpfungen zunehmen, solange diese Dämpfungen vorher bekannt sind und eine ausreichende Verstärkung eingefügt werden kann, um höhere Einfügungsdämpfungen zu kompensieren. Normale Spleiß- und Einfügungsdämpfungen sind etwa 0,2 dB, was bei einer passiven Sensorgruppe eine Zunahme der Rauschzahl um 40 dB bewirkt und die verstärkte Sensorgruppe relativ unverändert läßt.

[0107] Verstärkte Sensorgruppen sind deutlich besser als standardmäßige passive Sensorgruppen, was zu einer niedrigeren Systemrauschzahl und zu einem verbesserten SNR im Detektor führt, wenn Kopplungsfaktoren optimiert werden. Bei realistischen Spleiß- und Einfügungsdämpfungspegeln zeigt es sich, daß die verstärkten Sensorgruppen eine äquivalente SNR-Charakteristik bei Sensorgruppen mit einer Anzahl von Sensoren in einer Größenordnung haben, die größer ist als die Anzahl der Sensoren in den passiven Sensorgruppen. Der optimale Kopplungsfaktor hängt von der Sensorgruppen-Konfiguration und der Anzahl der Sensoren in der

Sensorgruppe ab und stellt die bevorzugten Entwurfparameter bereit, um das SNR für verstärkte Sensorgruppen zu maximieren. In allen Fällen hat sich gezeigt, daß die Verstärker-Koppler-Konfiguration der Koppler-Verstärker-Konfiguration überlegen ist, wobei sich geringfügig niedrigere Rauschzahlpegel in allen relevanten Parametern zeigen. Bei großen Sensorgruppenanordnungen, wo die Faserzahl und die Systemkomplexität von Bedeutung sind, haben verstärkte TDM-Sensorgruppen deutliche Aussichten gegenüber herkömmlichen passiven TDM-Sensorgruppen.

[0108] Obwohl dies oben in Verbindung mit Sensorgruppen so beschrieben ist, daß jeder Sensor einen Eingang und einen Ausgang hat und die Sensorgruppe einen Verteilungsbuss und einen Rückführungsbuss umfaßt, versteht es sich, daß der Sensor mit bidirektionalen Sensoren und mit einem bidirektionalen Bus arbeiten kann, der sowohl als Verteilungsbuss als auch als Rückführungsbuss fungiert. Eine solche Sensorgruppe **200** ist in **Fig. 9** dargestellt. Die Sensorgruppe **200** umfaßt einen einzelnen optischen Bus **204** (z. B. eine optische Faser), die sich zwischen einer Pumplaserquelle **102** und einer Pumplaserquelle **104** erstreckt, wie oben in Verbindung mit **Fig. 2** beschrieben. Die Ausgänge der Signalquelle **106**, die auch oben beschrieben ist, und die Pumplaserquelle **104** sind mit dem optischen Bus **204** über einen Wellenlängenmultiplexierer **208** gekoppelt, der dem Wellenlängenmultiplexierer **108** in **Fig. 2** entspricht. Der Detektor **126**, der oben beschrieben ist, ist auch mit dem optischen Bus **204** über einen Koppler **214** und den Wellenlängenmultiplexierer **208** gekoppelt. Als Alternative kann der Koppler **214** durch einen herkömmlichen optischen Zirkulator (nicht dargestellt) ersetzt sein, der das Licht aus der Laserquelle **106** über den Wellenlängenmultiplexierer **208** in den optischen Bus **204** einkoppelt. Der optische Zirkulator koppelt auch Licht, das vom optischen Bus **204** empfangen wird, über den Wellenlängenmultiplexierer **208** in den Detektor **126** ein.

[0109] Wie in **Fig. 9** dargestellt, ist der optische Bus **204** mit einer Vielzahl von Sensoren **210** über eine entsprechende Vielzahl von Kopplern **140** gekoppelt. Die Verstärker **130** zwischen den benachbarten Kopplern verstärken das Verteilungssignal, wie oben in Verbindung mit **Fig. 2** beschrieben. Anders als die Sensoren **110** in der Sensorgruppe **12** in **Fig. 2** sind die Sensoren **210** bidirektional, da sie nur einen einzigen Eingangs/Ausgangsanschluß haben. Das Licht, das in den Eingangs/Ausgangsanschluß eines Sensors eintritt, wird durch einen Parameter gestört, z. B. ein akustisches Signal, und das Licht tritt durch den gleichen Eingangs/Ausgangsanschluß aus und breitet sich in der entgegengesetzten Richtung aus. Die Koppler **140** sind bidirektional und koppeln das Licht von den Sensoren **210** wieder in den optischen Bus **204** ein, geben es aber in der entgegengesetzten Richtung zum Wellenlängenmultiplexierer **208** weiter. Die Verstärker **130** sind auch bidirektional und verstärken die Rückführungssignale auf die gleiche Weise wie die Rückführungsbussverstärker **132** in **Fig. 2**. Man kann also erkennen, daß die Sensorgruppe **200** in **Fig. 9** genauso arbeitet wie die Sensorgruppe **12** in **Fig. 2**, nur mit einem einzigen optischen Bus **204**.

[0110] Ebenso können die Sensorgruppe **14** in **Fig. 3** und die Sensorgruppe **16** in **Fig. 5a** unter Verwendung von Sensoren mit einzelnen Eingangs/Ausgangsanschlüssen in bidirektionale Sensorgruppen (nicht dargestellt) umgewandelt werden.

[0111] Nachstehend wird die Optimierung des Signal/Rausch-Verhältnisses großer Fasersensorgruppen beschrieben, die erbiumdotierte Faserverstärkertelemetrie in bezug auf die Anzahl der Sensoren pro Sprosse, die Anzahl der Verstärker pro Sensorgruppe und das Kopplungsfaktor zwischen den Faserbussen und den Sprossen nutzen. Es werden breite optimale Bereiche ermittelt, die für Entwurfsflexibilität sorgen, um die Pumpleistungsanforderungen zu minimieren. Simulationen sagen voraus, daß 300 Sensoren in einem Faserpaar multiplexiert werden können, während eine hohe Empfindlichkeit ($1 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$) bei allen Sensoren mit einer gemäßigten Eingangspumpleistung ($< 1 \text{ W}$) beibehalten wird.

[0112] Interferometrische faseroptische Schallsensoren haben bisher eine höhere Empfindlichkeit als $1 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ erreicht, was unter den typischen akustischen Rauschpegeln in Ozeanen besser ist als 10 dB. (Siehe beispielsweise P. Nash, "Review Interferometric Optical Fibre Hydrophone Technology", IEE Proceedings – Radar, Sonar And Navigation, Vol. 143, Juni 1996, S. 204–209; und A. D. Kersey, "A Review of Recent Developments in Fiber Optic Sensor Technology", Optical Fiber Technology: Materials, Devices and Systems, Vol. 2, Juli 1996, S. 291–317.) Viele Hydrophonanwendungen, insbesondere seismische Erforschungen von unter dem Meeresboden befindlichen Öllagerstätten, erfordern eine Multiplexierung einer großen Anzahl solcher Sensoren in wenigen Fasern und eine Anordnung der Sensoren über eine große Entfernung (1–50 km) von der Empfangselektronik. Wie oben bereits ausgeführt, kann eine zeitmultiplexierte (TDM-)Sensorgruppe mit mehreren Faserverstärkern mit geringer Verstärkung Hunderte von interferometrischen Sensoren an einem Faserpaar unterstützen. Bei diesem Verfahren bleibt der große dynamische Bereich ($> 120 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$) erhalten, der bestehenden interferometrischen Faserhydrophonsensoren eigen ist. Wie oben bereits ausgeführt, kann eine Sensorgruppe, die 10 Sprossen und 20 erbiumdotierte Faserverstärker (EDFAs) umfaßt, im Prinzip mehr als 100 Sensoren unterstützen. Sensorgruppen, die 64 Sensoren umfassen und zwei EDFAs verwenden, sind im Experiment demonstriert worden. (Siehe beispielsweise A. D. Kersey, A. Dandridge, A. R. Davis, C. K. Kirdendall, M. J. Matrone und D. G. Gross, "64-Element Time-Division Multiplexed Interferometric Sensor Array with EDFA Telemetry", in OFC'96, Vol. 2, 1996 OSA Technical Digest Series, paper ThP5.)

[0113] Wie vorstehend ausgeführt, unterstützt bei jeder grundlegenden Sensorgruppen-Konfiguration jede

Sprosse einen Sensor. Nachstehend werden Sensorgruppen-Konfigurationen beschrieben, bei denen mehrere Sensoren auf jeder Sprosse angeordnet sind (unter Verwendung von TDM). Bei richtiger Auswahl der Sensorgruppenparameter ergeben solche Sensorgruppen-Konfigurationen eine verbesserte Leistungsfähigkeit gegenüber der Konfiguration mit einem Sensor pro Sprosse. Insbesondere wird das Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) aller Sensoren verbessert, die Gesamtanzahl der Verstärker wird (bei einer gegebenen Gesamtanzahl von Sensoren) reduziert, und die Gesamtpumpleistung, die von den Verstärkern gefordert wird, wird reduziert. Bei dieser Topologie können nur etwa 25 Faserverstärker pro Bus **300** Sensoren an einem Faserpaar unterstützen, während alle Sensoren im wesentlichen gleiche SNRs von über 120 dB aufweisen. Die Pumpleistungsanforderung dieses Typs von Sensorgruppe wird nachstehend beschrieben, und es wird gezeigt, wie bei richtiger Auswahl der Sensorgruppenparameter diese Anforderung ohne signifikante Veränderung des SNR minimiert werden kann.

[0114] Sensorgruppenanordnungen, die typische passive Multiplexierverfahren verwenden, sind stark in der Anzahl der Sensoren begrenzt, die in einem Faserpaar multiplexiert werden können, wegen der passiven Verteilungsdämpfungen, die verbunden sind mit: erstens der Verteilung eines Signals von einer ersten Faser auf viele Sensoren und zweitens der Rekombination aller Signale in einer zweiten Faser. Wie oben beschrieben, besteht eine Möglichkeit zur Kompensation dieser passiven Verteilungsdämpfungen und zur Erhöhung der maximalen Anzahl von Sensoren pro Faserpaar darin, eine optische Faser vor jeden Koppler in beiden Bussen hinzuzufügen, wie in **Fig. 10** gezeigt. Ein einziger Signalimpuls (d. h. ein optisches Eingangssignal) wird in einen Verteilungsbus **300** eingegeben. Dieser Impuls wird von einem ersten Verstärker **302** mit einer Verstärkung G_d verstärkt, ein erster Koppler **304** gibt einen Teil C_d des Impulses an die erste Sprosse **306** ab, und der verbleibende Teil $(1 - C_d)$ wird an einen nachfolgenden Verstärker **302** übertragen. Die Verstärkung jedes Verstärkers **302** ist so festgelegt, daß genau alle nachfolgenden Dämpfungen (zumeist Kopplerverteilungsdämpfungen und Spleißdämpfungen) vor dem nächsten Verstärker kompensiert werden. Der Signalimpuls läuft auf diese Weise entlang des Verteilungsbusses **300**, und alle Sensoren **310** erhalten einen gleichen Betrag an Signalleistung. Ebenso wird ein Signalimpuls von jedem Sensor **310** (d. h. ein optisches Rückführungssignal) über einen Koppler **314** mit dem Kopplungsfaktor C_r in einen Rückführungsbus **312** eingekoppelt. Signale, die bereits im Rückführungsbus **312** sind, treffen auf einen Koppler, und der Teil $(1 - C_r)$ ihrer Leistung wird an einen nachfolgenden Verstärker mit einer Verstärkung G_r übertragen. Wie bereits ausgeführt, kompensiert jeder Verstärker genau die Dämpfungen zwischen den Verstärkern und ermöglicht einen verlustlosen Durchgang der Signale entlang des Rückführungsbusses **312** zu einem Detektor (nicht dargestellt). Jeder Sensor gibt einen großen und gleichen Betrag an Signalleistung an den Detektor als Ausgangssignal zurück, so daß alle Sensoren das gleiche SNR und somit identische Empfindlichkeiten haben. Bei richtiger Wahl der Signalimpulsbreite und des Abstands zwischen den Kopplern überschneiden sich keine zwei Rückführungssignalimpulse im Rückführungsbus **300**. (Siehe beispielsweise J. L. Brooks, B. Moslehi, B. Y. Kim und H. J. Shaw, "Time Domain Addressing of Remote Fiber Ptice Interferometric Sensor Arrays", Journal of Lighwave Technology, Vol. LT-5, Juli 1987, S. 1014–1023.) Der Signalimpuls, der vom ersten Sensor zurückgeführt wird, trifft zuerst ein, und der Signalimpuls, der vom letzten Sensor zurückgeführt wird, trifft zuletzt ein. Nachfolgende Signalimpulse werden in den Verteilungsbus **300** eingegeben, so daß sich die Ausgangssignale, die von nachfolgenden Signalimpulsen erzeugt werden, nicht mit den Ausgangssignalen überschneiden, die von vorher eingegebenen Signalimpulsen erzeugt worden sind, wodurch es möglich wird, daß entsprechende Impulse zeitlich aufgelöst werden. Signalimpulse laufen entlang beider Busse **300** und **312**, gewinnen und verlieren Leistung in jeder Stufe, erfahren jedoch keinen Gesamtgewinn oder -verlust. Durch periodische Regenerierung der Signale wird die fundamentale Begrenzung der passiven Sensorgruppen überwunden.

[0115] Alle Verstärker werden vom vorderen Ende der Sensorgruppe **320** durch Pumpsignale von einem (oder mehreren) Pumplasern ferngepumpt (siehe **Fig. 10**). Die Koppler führen eine Wellenlängenmultiplexierung (WDM) in der Ausführung durch, so daß sich die Pumpleistung nur entlang der Busse **300** und **312** ausbreitet und niemals in die Sprossen **310** eingekoppelt wird. Die Pumpleistung am ersten Verstärker **302** ist viel größer als die Pumpschwelle des Verstärkers; daher ist der erste Verstärker in einem Zustand hoher Pumpsättigung. Er absorbiert einen kleinen Bruchteil der einfallenden Pumpleistung und überträgt die hohe verbleibende Leistung an danach angeordnete Verstärker, die auch unter einem hohen Pumpsättigungsregime arbeiten. Die Pumpleistungsanforderung besteht darin, daß genug Pumpleistung in jeden Bus eingebracht wird, so daß die Pumpleistung am letzten Verstärker für einen einwandfreien Betrieb noch hoch genug ist. Das Endergebnis besteht darin, daß es möglich ist, das Mehrfache von zehn Verstärkern geringer Verstärkung von einem entfernten Ort mit einem gemäßigten Betrag an Pumpleistung (in der Größenordnung von 1 W bei 1480 nm) zu pumpen.

[0116] Um einen modularen Aufbau für die Sensorgruppe **320** zu erhalten, sind alle Koppler **304** im Verteilungsbus **300** vorzugsweise identisch (gleicher Kopplungsfaktor C_d), und alle Verstärker haben vorzugsweise die gleiche Länge (gleiche Verstärkung G_d). Ebenso sind die Koppler **314** (Kopplungsfaktor C_r) und die Verstärker **316** (Verstärkung G_r) im Rückführungsbus **312** vorzugsweise identisch, obwohl C_d und C_r unterschiedlich sein können und G_d und G_r unterschiedlich sein können. Die ersten Verstärker in jedem Bus (d. h. die Verstär-

ker, die den jeweiligen Pumpquellen am nächsten sind) empfangen und absorbieren mehr Pumpleistung als die letzten, so daß die Verstärkungen der ersten Verstärker größer sind als die Verstärkungen der letzten. Diese Verstärkungsdifferenzen sind jedoch bei hoher Pumpleistung klein und können ignoriert werden. Somit geben alle Sensoren nahezu identische Beträge an Signalleistung zurück. Um verschiedene Konfigurationen zu vergleichen, wird die Systemrauschzahl (NF) verwendet, die bereits definiert worden ist:

$$NF_{\text{system}} = \frac{SNR_{\text{into array}}}{SNR_{\text{out worst sensor}}} \quad (12)$$

[0117] Da jeder Verstärker eine geringe Verstärkung hat, fügt jeder kontinuierlich nur einen kleinen Betrag an Rauschen in Form von verstärkter Spontanemission (ASE) hinzu. Da jeder Verstärker, wie oben ausgeführt, vorzugsweise die gleiche Signalleistung zurückgibt und von der Dauerstrich-ASE gleichmäßig beeinflusst wird, ist das SNR ebenfalls bei allen Sensoren identisch.

[0118] Die Konfiguration in **Fig. 10** hat einen Sensor pro Sprosse und insgesamt N Sensoren und somit ein Paar Verstärker pro Sensor (d, h. insgesamt 2 N Verstärker für die Sensorgruppe. Die Konfiguration in **Fig. 10** erzeugt eine geeignete Rauschzahl, erfordert jedoch eine große Anzahl von Verstärkern (zwei pro Sensor) und somit eine hohe Pumpleistungsbilanz. Um die Anzahl der Verstärker zu reduzieren, können mehrere Sensoren auf jeder Sprosse unter Verwendung von Sternkopplern **330** angeordnet sein, wie in einer Sensorgruppe **331** in **Fig. 11** mit einem Verteilungsbus **344**, einem Rückführungsbus **346** und einer Vielzahl von Sprossen **334** dargestellt. Wenn ein Paar von $1 \times j$ Sternkopplern **330** verwendet wird, um j Sensoren **332** in jeder Sprosse **334** anzuordnen, reduziert sich die Anzahl der Verteilungsbusverstärker **336** und die Anzahl der Rückführungsbusverstärker **337** um einen Faktor j. Dies führt zu einer niedrigen Pumpleistungsanforderung und zu einer anderen Rauschzahl bei den Rückführungssignalen. Zwei antagonistische Wirkungen beeinflussen diese Rauschzahl. Die erste besteht darin, daß, wenn die Anzahl der Verstärker **336**, **337** reduziert wird, die ASE, die zu einem Detektor zurückgeführt wird (nicht dargestellt), sinkt und die Rauschzahl sich verbessert. Die zweite Wirkung besteht darin, daß, wenn j zunimmt, die Verteilungsdämpfung der Sternkoppler **330** zunimmt, so daß die Signalleistung, die von jedem Sensor zurückgegeben wird, um einen Faktor j^2 abnimmt (zwei Koppler pro Sprosse) und die Rauschzahl sich verschlechtert.

[0119] Einen weiteren Einfluß auf die Rauschzahl übt der Kopplungsfaktor der Koppler **340** und **342** aus, die im Verteilungsbus **344** bzw. im Rückführungsbus **346** angeordnet sind. Die Verstärkung jedes Verteilungs- und Rückführungsbusverstärkers **336** und **337** steht durch die Anforderung, daß der Verteilungsbusdurchgang T_d und der Rückführungsbusdurchgang T_r von einem Verstärker zum nächsten verlustlos ist, in direkter Beziehung zu diesen Kopplungsfaktoren,

$$T_d = G_d L_x (1 - C_d) = 1 \quad (12a)$$

$$T_r = G_r L_x (1 - C_r) = 1 \quad (12b)$$

wobei L_x die Zusatzdämpfung zwischen den Verstärkern aufgrund der Spleiße und des Kopplers ist. Diese Anforderung des verlustlosen Durchgangs ist notwendig, damit jeder Sensor einen gleichen Betrag an Signalleistung zurückgibt. Wenn die Kopplungsfaktoren erhöht werden, wird mehr Signalleistung an jede Sprosse abgegeben und an den Detektor zurückgegeben, und das SNR verbessert sich. Durch Erhöhung der Kopplungsfaktoren wird die Signaldämpfung in jeder Sprosse $L_{\text{rung}} = L_s \cdot L_j^2$, teilweise kompensiert, wobei L_s die Durchgangsdämpfung eines einzelnen Sensors und L_j die Verteilungsdämpfung eines $1 \times j$ -Sternkopplers ist. Der Durchgang vom Verteilungsbus **344** zu einer Sprosse **334** über einen Sensor **332** und zum Rückführungsbus **346** ist wie folgt:

$$T_{d-r} = G_d L_x C_d L_{\text{rung}} G_r L_x C_r = \frac{C_d}{1 - C_d} L_{\text{rung}} \frac{C_r}{1 - C_r} \quad (13)$$

wobei die Gleichungen 12 angewendet werden. Der Durchgang ist größer als L_{rung} , wenn $C_d > (1 - C_d)$ und $C_r > (1 - C_r)$, was dann erfüllt ist, wenn beispielsweise $C_d > 50\%$ und $C_r > 50\%$. Bei dieser Wahl der Kopplungsfaktoren erfährt das Signal eine Gesamtverstärkung beim Eintritt in eine Sprosse und beim Austritt aus dieser, wobei die Tendenz besteht, daß L_{rung} kompensiert wird. Ferner erhöht diese Wahl die Signalleistung, die an den Detektor zurückgegeben wird und verbessert die Rauschzahl. Aber durch Erhöhung der Kopplungsfaktoren und der Verstärkungen der Verstärker erhöht sich auch die Pumpleistungsbilanz. Ein bestimmter Kompromiß zwischen der Rauschzahl und der Pumpleistungsanforderung muß also gefunden werden.

[0120] Um das Rauschverhalten der neuen Topologie, die in **Fig. 11** dargestellt ist, zu analysieren, ist es notwendig, die Konfiguration (Wert für j und n und die Kopplungsfaktoren C_d und C_r) zu bestimmen, die die niedrigste Rauschzahl bei einer gegebenen Gesamtanzahl von Sensoren N erzeugt, wobei gleichzeitig vertretbare

Signal- und Pumpleistungen verwendet werden.

[0121] Die drei primären Beiträge zur Rauschzahl für die Sensorgruppe **331** in **Fig. 11** sind (1) die Signaldämpfung, (2) die akkumulierte ASE, die von den Verteilungsbusverstärkern erzeugt wird, den Detektor über die Sensoren erreicht und ein Signal-ASE-Schwebungsrauschen bewirkt, und (3) die akkumulierte ASE, die von den Rückführungsbusverstärkern erzeugt wird, den Detektor erreicht und ebenfalls ein Signal-ASE-Schwebungsrauschen erzeugt. Die akkumulierte ASE erzeugt auch ASE-ASE-Schwebungsrauschen und ASE-Schrotrauschen, aber da die Signalleistung viel größer ist als die ASE-Leistung, sind diese Rauschterme klein und werden ignoriert. Die ASE akkumuliert sich in der vorliegenden Erfindung anders als in einem Punkt-zu-Punkt-Kommunikationssystem mit einem einzigen Weg, da ein getrennter Weg durch jeden Sensor vorhanden ist und sich die vielen ASE-Beiträge alle im Rückführungsbus summieren. Wenn man beispielsweise nur die ASE berücksichtigt, die vom ersten Verstärker **306** im Verteilungsbus **344** in **Fig. 11** erzeugt wird, so wird ein Teil der ASE in den ersten Sensor eingekoppelt, und der Rest läuft entlang des Verteilungsbusses **344**. Wegen des verlustlosen Durchgangs entlang des Verteilungsbusses **344** wird in alle anderen Sensoren der gleiche Teil der ASE eingekoppelt. Die ASE, die am Detektor gesammelt wird und die nur im ersten Verteilungsbusverstärker **336** entsteht, erhöht sich mit der Anzahl der Sprossen n in der Sensorgruppe **331**. Die Rückführungsbusverstärker **337** erzeugen auch ASE-Signale, die (ohne Interferenzeffekte) im Rückführungsbus **346** inkohärent hinzukommen. Wie oben bereits ausgeführt, können diese verschiedenen Beiträge addiert werden, um die Gesamt-ASE-Leistung am Detektor zu ermitteln, aus der die Rauschzahl berechnet werden kann. Wenn wir annehmen, daß die Koeffizienten C_d bei allen Verteilungsbuskopplern identisch sind, und ebenso annehmen, daß die Koeffizienten C_r bei allen Rückführungsbuskopplern identisch sind, dann sind die Verstärkungen G_d bei allen Verteilungsbusverstärkern identisch, und die Verstärkungen G_r sind bei allen Rückführungsbusverstärkern identisch, und wenn wir annehmen, daß die Gleichungen **12** durchgehend erfüllt sind, dann zeigt sich, daß die NF, die in der Gleichung **8** gezeigt ist, der gleiche ist wie bei allen Sensoren, nämlich:

$$NF = \frac{j^2 L_x^2 (1 - C_r)(1 - C_d)}{C_d C_r L_s} + \frac{j[1 - (1 - C_d)L_x]n(n+1)n_{sp}}{C_d C_r L_s} + \frac{2j^2 L_x n(1 - C_d)[1 - (1 - C_r)L_x]n_{sp}}{C_d C_r L_s} \quad (8)$$

wobei $N = j \cdot n$ die Gesamtanzahl der Sensoren pro Sensorgruppe ist, j die Anzahl der Sensoren pro Sprosse, n die Anzahl der Sprossen pro Sensorgruppe und n_{sp} der Verstärkerinversionsparameter, der sich mit zunehmender Pumpleistung von oben eins nähert. Die drei NF-Terme beziehen sich auf das Signalschrotrauschen, das Signal-ASE-Schwebungsrauschen für die ASE, die in den Verteilungsbusverstärkern entsteht, bzw. das Signal-ASE-Schwebungsrauschen für die ASE, die in den Rückführungsbusverstärkern entsteht. Weitere Rauschterme, z. B. ASE-ASE-Schwebungsrauschen, ASE-Schrotrauschen, elektronisches Detektonauschen, relatives Intensitätsrauschen des Signallasers, Phasenrauschen, das durch Sensorunsymmetrien in Amplitudenrauschen umgewandelt wird usw. sind normalerweise viel kleiner und sind hier nicht einbezogen.

[0122] Bei einer erforderlichen Gesamtanzahl von Sensoren kann die Gleichung **8** verwendet werden, um eine optimale Kombination aus der Anzahl der Sensoren pro Sprosse und der Anzahl der Sprossen so zu wählen, daß die Rauschzahl minimiert wird. Um so zu verfahren, werden ganzzahlige Werte für j und n mit einem Produkt nahe oder gleich dem erforderlichen N in die Gleichung **8** eingesetzt, um die Rauschzahl für jede Kombination zu berechnen. Die Kombination $\{j, n\}$, die die niedrigste Rauschzahl erzeugt, wird dann als optimale Konfiguration gewählt. **Fig. 12** zeigt vier Kurven der NF gegen Anzahl von Sensoren pro Sprosse j bei Sensorgruppen mit verschiedenen Gesamtzahlen von Sensoren N , wenn man folgendes annimmt: $C_d = 80\%$, $C_r = 50\%$, $L_s = 5$ dB und $L_x = 0,4$ dB. Es wird später gezeigt, daß diese Werte der Kopplungsfaktoren die Rauschzahl optimieren, während ein vernünftiger Pumpleistungsbilanz beibehalten wird. Der Wert $L_s = 5$ dB entsteht aus der Dämpfung von 3 dB aufgrund des interferometrischen Sensors, der bei Quadratur systematisch fehlerbehaftet ist, um maximale Empfindlichkeit zu erreichen, und der Faserkrümmungsdämpfung, die bei einer Faser von wenigen hundert Metern, die auf einen Dom mit einem Durchmesser von 3 cm oder weniger gewickelt ist, normalerweise 2 dB beträgt. L_x umfaßt die Zusatzdämpfung eines Buskopplers (normalerweise 0,3 dB) und die Einfügungsdämpfungen der beiden Spleiße zwischen einer Er-dotierten Faser und einer normalen Einmodenfaser (normalerweise jeweils 0,05 dB). **Fig. 12** zeigt, daß bei einer festen Anzahl von Sensoren pro Sprosse die Rauschzahl erhöht wird, wenn die Gesamtanzahl der Sensoren pro Sensorgruppe zunimmt. Jede Kurve stellt ein Minimum bei einer bestimmten optimalen Anzahl von Sensoren pro Sprosse dar. Das Minimum für jede Kurve tritt auf, wenn die beiden Signal-ASE-Schwebungsrausch-Tenne (zweiter und dritter Term) der Gleichung **8** gleich sind. Links vom Minimum erzeugt die ASE, die vom Verteilungsbus ausgeht (zweiter Term), der dominante Rauschterm im Empfänger. Rechts vom Minimum wird der dominante Rauschterm durch ASE erzeugt, die im Rückführungsbus entsteht (dritter Term). Wenn man Gleichung **8** betrachtet, so ist der zweite Term proportional $j \cdot n \cdot (n + 1)$, was sich auf $N \cdot (n + 1)$ reduziert, und der dritte Term ist proportional $j^2 \cdot n$, was sich

auf $N \cdot j$ reduziert. Links vom Minimum ist ein ausreichend großes Signal, das zum Detektor zurückgeführt wird, aber es sind zu viele Verstärker vorhanden. Am Detektor ist die Akkumulation der ASE von den Verteilungsbusverstärkern proportional $n \cdot (n + 1)$. Wenn die Anzahl der Verstärker n deutlich reduziert wird, verringert sich die zurückgegebene ASE. Rechts vom Minimum nimmt die Dämpfung einer Sprosse L_{rung} zu, wenn j zunimmt, wobei sowohl das Signal als auch die ASE vom Verteilungsbus gedämpft wird. In diesem Fall ist das Rückführungssignal nicht groß genug, und die ASE, die durch die Rückführungsbustverstärker erzeugt wird, erzeugt ein Signal-ASE-Schwebungsrauschen, das die Rauschzahl dominiert. Die Lage des Minimums kann bewertet werden, indem in Gleichung 8 die Ableitung in bezug auf j durchgeführt wird (wobei der kleine erste Term ignoriert wird), woraus sich folgendes ergibt:

$$j = \sqrt{\frac{N \cdot C_d \cdot C_r \cdot L_x [1 - (1 - C_d) L_x]}{2(1 - C_d) L_x [1 - (1 - C_r) L_x]}} \quad (14)$$

[0123] Für eine Gruppe von 60 Sensoren (**Fig. 12**, untere Kurve) und eine Konfiguration, die einen Sensor pro Sprosse und somit 60 Verstärker pro Bus enthält, wird eine relativ hohe NF (35,7 dB) vorhergesagt. Wenn statt dessen die Anzahl der Sensoren pro Sprosse auf zwei (d. h. 30 Verstärker pro Bus) erhöht wird, verbessert sich die NF auf 33,1 dB. Bei $N = 60$ wird eine minimale NF von 31,3 dB bei $j = 5$ Sensoren pro Sprosse erreicht. Wenn j wiederum auf 10 verdoppelt wird und die Anzahl der Verstärker um die Hälfte auf 6 reduziert wird (so daß N noch gleich 60 ist), verschlechtert sich die NF (auf 32,1 dB).

[0124] Das Minimum für jede Kurve in **Fig. 12** ist sehr breit, was in der Praxis eine große Entwurfsflexibilität ermöglicht, um andere Parameter zu optimieren, z. B. die Pumpleistungsbilanz, wie nachstehend beschrieben wird. Für eine Gruppe mit 320 Sensoren (**Fig. 12**, obere Kurve) ergeben sich 27 Verstärker pro Bus. Wenn statt dessen die Sensorgruppe aus 18 Sensoren pro Sprosse und $320/18 \approx 18$ Verstärker pro Bus bestünde, würde sich die Rauschzahl unwesentlich um 0,25 dB verschlechtern. Dagegen würde die Pumpleistungsanforderung deutlich reduziert werden, da die Anzahl der Verstärker von 27 auf 18 reduziert wird. Deshalb kann die Pumpleistungsanforderung deutlich gegenüber der Pumpleistungsanforderung für die optimale Konfiguration reduziert werden, indem die Anzahl der Sprossen reduziert und die Anzahl der Sensoren pro Sprosse erhöht wird, allerdings ein wenig auf Kosten der Rauschzahl.

[0125] Die optimale Anzahl der Sensoren pro Sprosse (j) und die optimale Anzahl der Verstärker pro Bus (n) gegen die Gesamtanzahl der Sensoren pro Gruppe (N) ist in **Fig. 13** gezeigt. Die beiden Kurven in **Fig. 13** sind von der Ortskurve der Minima in **Fig. 12** abgeleitet. Die untere Kurve ist ein Komplement der oberen Kurve. Das heißt, bei irgendeinem Wert der Abszisse N in **Fig. 13** entspricht das Produkt den Ordinaten der beiden Kurven N . Diese Kurven ergeben die optimalen Werte für j und n , um eine Sensorgruppe mit minimaler Rauschzahl herzustellen. Wenn beispielsweise eine Sensorgruppe von 200 Sensoren erforderlich ist, würde die optimale Konfiguration aus 10 Sensoren pro Sprosse (untere Kurve) und 20 Sprossen (obere Kurve) bestehen. Diese Kurven sind eine Funktion der bestimmten Werte, die für C_d , C_r , L_s und L_x gewählt worden sind. Es versteht sich in **Fig. 13**, daß in den meisten Fällen der optimale Wert kein ganzzahliger Wert ist. Die Anzahl der Sensoren pro Sprosse wird also so gewählt, daß sie ein nahezu ganzzahliger Wert zum optimalen Wert ist, und die Anzahl der Verstärker (d. h. die Anzahl der Sprossen) wird so gewählt, daß sie annähernd die gewünschte Anzahl der Sensoren darstellt.

[0126] Die zweite Gruppe der Parameter, die bei der Optimierung der Rauschzahl herangezogen werden, ist der Kopplungsfaktor der Buskoppler (C_d und C_r) und die entsprechende Verstärkung der Verstärker (G_d und G_r). Um die optimalen Kopplungsfaktoren für die minimale Rauschzahl und die minimale Pumpenanforderung zu bestimmen, wird die Abhängigkeit der Systemrauschzahl vom Verteilungsbuskopplungsfaktor (C_d) und vom Rückführungsbuskopplungsfaktor (C_r) berücksichtigt, die in **Fig. 14** dargestellt ist, und zwar bei einer Sensorgruppe von 200 Sensoren. Um die Abhängigkeit der NF vom C_d zu berechnen (durchgezogene Linie), wurde C_r auf 50% gesetzt, und die Anzahl der Sensoren pro Sprosse j wurde für jeden C_d gewählt, um die Rauschzahl zu minimieren. Diese optimale Anzahl der Sensoren pro Sprosse ist im unteren Teil von **Fig. 14** dargestellt (die durchgezogene Linie ist eine Glättung, die an die ganzzahligen Ordinaten angepaßt ist). Um die Abhängigkeit der NF vom C_r zu berechnen (gestrichelte Kurve), wurde C_d auf 80% gesetzt und j auf 10, was die optimale Anzahl der Sensoren pro Sprosse für diesen Wert des C_d aus dem unteren Teil von **Fig. 14** ist. Die Rauschzahl verbessert sich deutlich mit zunehmenden C_d , und somit sind Verteilungsbustverstärker mit möglichst großer G_d erwünscht. Bei C_d kleiner als annähernd 30% wird eine unzweichende Signalleistung in eine Sprosse eingekoppelt, um mehr als eine oder zwei Sensoren pro Sprosse zu unterstützen (untere durchgezogene Kurve). Bei nur wenigen Sensoren pro Sprosse ist eine große Anzahl der Verstärker in der Sensorgruppe vorhanden, und die NF ist hoch. Bei Zunahme des C_d wird mehr Signalleistung in jede Sprosse eingekoppelt, und somit können mehr Sensoren in jeder Sprosse unterstützt werden (untere Kurve steigt) und die NF verbessert sich (obere Kurve fällt). Die Gesamtpumpleistungsanforderung kann reduziert werden, indem $C_d \approx 80\%$ und eine Verstärkerleistung $G_d \approx 7,4$ dB gewählt werden. Verstärker mit deutlich größeren Verstärkungen wären bei dem Fernpumpschema, das hier beschrieben wird, nicht kompatibel, da eine einzelne Fernpumpquelle nicht genü-

gend Leistung für das Mehrfache von zehn größeren Verstärkern bereitstellen kann. Andererseits ist die Rauschzahl gegen C_r bei $C_r > 40\%$ ziemlich konstant (gestrichelte Kurve). Bei diesem breiten konstanten Bereich ist es möglich, Pumpleistungsbilanzüberlegungen in die Auswahl des optimalen Wertes für C_r einzubeziehen. Wenn C_r zunimmt, nimmt G_r entsprechend zu, wobei die Pumpleistungsanforderung zunimmt. Deshalb ist C_r vorzugsweise möglichst klein, ohne die NF zu stark zu beeinträchtigen, was bis zu diesem Punkt ist der Grund für die Wahl von $C_r = 50\%$ ist. Wenn statt dessen C_r mit 25% gewählt wird, um die Pumpleistungsanforderung weiter zu verringern, verschlechtert sich die NF um nur 0,4 dB. Bei der Wahl von $C_d = 80\%$ und $C_r = 50\%$ ist die optimale Konfiguration, nämlich $N = 200$ Sensoren zur Minimierung des NF folgende: $n = 20$ Sprossen mit jeweils $j = 10$ Sensoren.

[0127] Alle diese Auswirkungen werden in **Fig. 15** berücksichtigt, wo die Rauschzahl gegen die Gesamtanzahl von Sensoren bei der verstärkten Sensorgruppe gezeigt ist (durchgezogene Kurve). Bei einer gegebenen Anzahl von Sensoren N wurde die optimale Anzahl der Sensoren pro Sprosse und der Sprossen pro Sensorgruppe (j , n) so gewählt, daß sich die minimale NF ergibt, wie in **Fig. 13** gezeigt, und es wurden feste Kopplungsfaktoren $C_d = 80\%$ und $G_r = 50\%$ verwendet. Die Rauschzahl für eine typische passive Leiter-Sensorgruppe (gestrichelte Linie) ist zum Vergleich dargestellt. Um das SNR von 120 dB in einer Bandbreite von 1 Hz bei einer mäßigen Eingangssignalleistung (5 mW) beizubehalten, muß die Systemrauschzahl unter der gestrichelten Horizontallinie in **Fig. 15** liegen ($NF < 45$ dB). Bei dieser optimierten Konfiguration ist es möglich, mehr als 300 Sensoren an einem einzigen Faserpaar zu unterstützen, während eine passive Sensorgruppe nur etwa 20 Sensoren unterstützen kann.

[0128] Obwohl die Kurve in **Fig. 15** die SNR-Linie für 120 dB nicht durchquert hat, wird es zunehmend schwierig, über eine Gesamtzahl von 300 Sensoren hinaus noch mehr Sensoren zu unterstützen, und zwar aus zwei Gründen. Der erste Grund besteht darin, daß das Tastverhältnis, mit dem die Sensoren abgetastet werden, zu klein wird. Bei insgesamt 300 Sensoren ist das Tastverhältnis annähernd 1/300, und dies hat großen Einfluß auf das Eingangssignal. Eine durchschnittliche Eingangssignalleistung von 5 mW erfordert bei diesem Tastverhältnis eine Signaleingangsspitzenleistung von 1,5 W. Die Signalleistung ist durch nichtlineare Fasereffekte, z. B. durch spontane Raman-Streuung und spontane Brillouin-Streuung, annähernd auf diesen Pegel beschränkt. Der zweite Grund besteht darin, daß ein Randbereich für die kleinen Differenzen des SNR entlang der Sensorgruppe erlaubt sein muß. Wegen der durchgeführten Näherungen, insbesondere wegen der Annahme, daß alle Verstärker die gleiche Verstärkung haben, obwohl die Pumpleistung entlang der Sensorgruppe verbraucht wird, kann eine geringe dB-Differenz im SNR der Sensoren erwartet werden. Das mittlere SNR für alle Sensoren ist in **Fig. 15** gezeigt. Das mittlere SNR ist vorzugsweise geringfügig höher als 120 dB, so daß die "schlechtesten" Sensoren immer noch besser sind als 120 dB.

[0129] Wenn eine praktische Sensorgruppe aufgebaut wird, haben die Koppler eine spezifische Verteilung der Kopplungsfaktoren um ihren nominellen Wert. Bei einer bestimmten Sprosse kann man erwarten, daß der Kopplungsfaktor C_d und C_r in bezug auf seinen nominellen Wert C_d^0 und C_r^0 um einen kleinen Betrag differiert. Diese Nichtübereinstimmung hat zwei Auswirkungen, erstens auf den Durchgang des Signals in jedem Bus und zweitens auf den Durchgang des Signals vom Verteilungsbus durch eine Sprosse zum Rückführungsbus.

[0130] Die erste Auswirkung kann einfach dadurch vermieden werden, daß die Verstärkung der entsprechenden Verstärker reguliert wird, so daß die Eins-Verstärkungsbedingungen (Gleichungen 12a und 12b) dennoch erfüllt sind. Wenn im Verteilungsbus ein einzelner Koppler von seinem nominellen Kopplungsfaktor um einen Faktor $(1 + \delta_d)$ abweicht, d. h. wenn er $C_d^0(1 + \delta_d)$ entspricht, muß die Verstärkung des benachbarten Verstärkers in bezug auf die nominelle Verstärkung G_d^0 um einen Faktor $(1 + \varepsilon_d)$ reguliert werden, um den verlustlosen Durchgang entlang des Busses beizubehalten. Wenn im Rückführungsbus ein Koppler von seinem nominellen Wert um einen Faktor $(1 + \delta_r)$ abweicht, d. h. $C_r^0(1 + \delta_r)$, dann muß ebenfalls die Verstärkung des benachbarten Verstärkers in bezug auf seine Nominalverstärkung G_r^0 um einen Faktor $(1 + \varepsilon_r)$ korrigiert werden. Somit sind die Verteilungs- und die Rückführungsbusdurchgänge (Gleichungen 12a und 12b) folgende:

$$T_d^1 = [G_d^0(1 + \varepsilon_d)]L_x[1 - C_d^0(1 + \delta_d)] = 1 \quad (15a)$$

$$T_r^1 = [G_r^0(1 + \varepsilon_r)]L_x[1 - C_r^0(1 + \delta_r)] = 1 \quad (15b)$$

[0131] Die Auflösung der Gleichungen 15a und 15b nach ε in bezug auf δ ergibt

$$\varepsilon_d = \frac{G_d^0 L_x C_d^0 \delta_d}{1 - G_d^0 L_x C_d^0 \delta_d} \approx \delta_d \frac{C_d^0}{1 - C_d^0} \quad (16)$$

und eine ähnliche Formel für ε_r . Man beachte, daß δ und ε das gleiche Vorzeichen haben. Wenn ein Koppler ein kleines zusätzliches Signal in eine Sprosse einkoppelt, muß der entsprechende Verstärker eine geringfügig höhere Verstärkung haben, um dies zu kompensieren.

[0132] Die zweite Auswirkung besteht darin, daß der Durchgang vom Verteilungsbus durch eine Sprosse zum

Rückführungsbus (Gleichung 13) folgender ist:

$$T_{d-r}^1 = G_d^0(1 + \varepsilon_d)L_x C_d^0(1 + \delta_d)L_{\text{rungs}}G_r^0(1 + \varepsilon_r)L_x C_r^0(1 + \delta_r) \quad (17)$$

[0133] Man beachte, daß T_{d-r}^1 zweimal so stark betroffen ist, da δ und ε das gleiche Vorzeichen haben. Der Grund dafür ist folgender: Wenn ein Kopplungsfaktor eines Kopplers nicht sehr hoch ist, hat sein entsprechender Verstärker eine geringfügig höhere Verstärkung, und diese beiden Auswirkungen addieren sich. Durch Wählen von Kopplerpaaren C_d und C_r , die von ihren Nominalwerten mit entgegengesetzten Vorzeichen abweichen, kann erreicht werden, daß der tatsächliche Durchgang (Gleichung 17) gleich der nominellen Durchgang ist (Gleichung 13). Die Bedingung, die erfüllt sein muß, um dieser Gleichheit zu erreichen, ist folgende:

$$[G_d^0(1 + \varepsilon_d)L_x C_d^0(1 + \delta_d) \cdot L_{\text{rungs}}][G_r^0(1 + \varepsilon_r)L_x C_r^0(1 + \delta_r)] = G_d^0 L_x C_d^0 L_{\text{rungs}} G_r^0 L_x C_r^0 \quad (18)$$

wobei eine Näherungslösung für δ_r in bezug auf δ_d folgende ist:

$$\delta_r \approx -\delta_d \frac{1 - C_r^0}{1 - C_d^0} \quad (19)$$

[0134] Man beachte, daß δ_d und δ_r entgegengesetzte Vorzeichen haben. Wenn die Gleichung 19 erfüllt ist, gleicht die Differenz des Durchgangs vom Verteilungsbus zur Sprosse die Differenz des Durchgangs von der Sprosse zum Rückführungsbus aus. Wenn jedes Kopplerpaar die Gleichung 19 erfüllt, geben alle Sensoren den gleichen Betrag an Signalleistung zurück und haben das gleiche SNR.

[0135] Wenn die Verstärker jedoch alle länger ausgeführt wären, so daß eine geringere Gesamtverstärkung entlang jedes Busses bereitgestellt würde, würde die Signalleistung geringfügig steigen und somit die Verstärkung der Verstärker geringfügig drücken. Wenn dagegen die Verstärker alle zu kurz ausgeführt wären, so daß sich eine kleinere Gesamtdämpfung entlang jedes Busses ergäbe, würde der Signalpegel entlang des Busses entsprechend fallen. Bei den niedrigeren Signalpegeln bestünde die Tendenz, daß die Verstärker eine geringfügig größere Verstärkung bereitstellen und der Signalpegel nicht so schnell fallen würde. Das System ist also selbstregulierend, und die Signalleistung nimmt nicht unbegrenzt zu.

[0136] Nachfolgend wird beschrieben, wie die Pumpleistung, die für große Fasersensorgruppen erforderlich ist, die eine erbiumdotierte Faserverstärkertelemetrie verwenden, in bezug auf die Anzahl der Verstärker pro Bus, die Anzahl der Sensoren pro Sprosse und die Verstärkung pro Verstärker minimiert werden kann. Bei einer großen Sensorgruppe wird die Pumpleistungsanforderung durch passive Komponentendämpfungen entlang der Sensorgruppe dominiert. Verschiedene Verfahren (einschließlich alternative Sensorgruppentopologien) zur Reduzierung der Leistungsanforderung bei gleichzeitiger Minimierung der starken Auswirkung dieser Reduzierung auf das Signal/Rausch-Verhältnis sind hier beschrieben. Ein Paar Faserbusse können 300 hochempfindliche ($1 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$) Sensoren mit weniger als 1 W Pumpleistung pro Bus bei 1480 nm unterstützen, eine Anforderung, die mit Laserdioden vertretbar und erreichbar ist.

[0137] Die verbreitete Anwendung für Faserhydrophone brachte den Bedarf nach einem effizienten Multiplexierungsschema hervor. Um eine groß angelegte Multiplexierung zu ermöglichen, ist bereits oben gezeigt worden, daß durch Hinzufügung von optischen Verstärkern zu Leiterstrukturen von Fasersensoren die Sensorgruppenleistung dramatisch verbessert und die Größe der Gruppen bis zu Hunderten von Sensoren pro Faserpaar vergrößert werden kann. Es ist außerdem gezeigt worden, daß diese Methode eine praktische Lösung zur Multiplexierung großer Anzahlen von Sensoren ist. Wie bereits ausgeführt, kann die Sensorgruppe optimiert werden, um ein ausgezeichnetes Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) zu ermöglichen, während gleichzeitig die Anzahl der Sensoren pro Faserpaar erhöht wird. Die verbleibende Beschreibung betrifft die Pumpleistungsanforderung der verstärkten Sensorgruppe. Die erste Aufgabe besteht darin, die Leistungsanforderung einer praktischen Sensorgruppe, die Hunderte von Sensoren enthält, theoretisch zu bewerten, wobei demonstriert werden soll, daß der Pumpleistungsverbrauch der Sensorgruppe durch die passiven Dämpfungen der Koppler und der Fasern dominiert wird und daß bei einer großen Sensorgruppe diese Anforderung bei verfügbaren Laserdioden vertretbar und erreichbar ist. Die zweite Aufgabe besteht darin, die Leistungsanforderung zu reduzieren, die einen Kompromiß zwischen der Pumpleistung und dem Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) der Signale erfordert, die von den Sensoren zurückgeführt werden. Mehrere Verfahren, einschließlich alternative Sensorgruppentopologien werden beschrieben, die die Leistungsanforderung reduzieren und gleichzeitig die Auswirkung dieser Reduzierung auf das SNR minimieren. Bei dieser Methode und bei dieser aktuellen Faserkomponententechnologie kann ein Paar Busfasern **300** hochempfindliche ($1 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$) Sensoren mit weniger als 1 W bei 1480 nm Pumpleistung pro Bus unterstützen.

[0138] Der Betrieb dieser zeitmultiplexierten (TDM-)Sensorgruppen, wie in **Fig. 16** gezeigt, wurde bereits oben ausführlich beschrieben. Siehe dazu auch beispielsweise J. L. Brooks, B. Moslehi, B. Y. Kim und H. J. Shaw, "Time Domain Addressing of Remote Fiber Optic Interferometric Sensor Arrays", Journal of Lightwave

Technology, Vol. LT-5, Juli 1987, S. 1014–1023. Um alle diese Sensoren abzutasten, wird ein Signalimpuls (d. h. ein optisches Eingangssignal) in einen Verteilungsbus **400** der Sensorgruppe **402** eingegeben, und ein großer Bruchteil (normalerweise > 50%) des Signalimpulses wird periodisch in jede Sprosse **404** der Leiter unter Verwendung eines Faserkopplers **406** eingekoppelt. Jede Sprosse **404** unterstützt einen oder mehrere Sensoren **408**. Jeder Sensor **408** gibt einen Signal-(d. h. einen optischen Rückführungssignal-)Impuls in seinem eigenen Zeitfenster zurück, und alle Impulse werden in einem Rückführungsbus **420** gesammelt und als Ausgangssignale an einen Empfänger (nicht dargestellt) übertragen. Optische Verstärker **422** und **424**, die entlang der Verteilungs- und Rückführungsbusse **400** und **420** verteilt sind, kompensieren die Verteilungsdämpfung der Koppler **406** und kompensieren alle zusätzlichen Leistungsverluste. Die Verstärker **422** und **424** ermöglichen einen verlustlosen Durchgang entlang jedes Busses, geben die gleichen Beträge an Signalleistung an alle Sensoren **408** ab, und die Sensorgruppe **402** gibt die gleichen Beträge an Signalleistung von allen Sensoren an den Empfänger zurück. Die Sensorgruppe **402** arbeitet vorzugsweise mit einer Signalwellenlänge in einem Bereich von 1550 nm und verwendet erbiumdotierte Faserverstärker (EDFAs). Da die Dämpfungen pro Verstärkerstufe klein sind (3 bis 8 dB), ist eine geringe Verstärkung ausreichend, und die Verstärker **422** und **424** sind einfach kurze Segmente von erbiumdotierten Fasern (EDF), die in die Busse **400** und **420** eingespleißt sind. Die Verstärkung jedes der Verstärker **422**, **424** wird durch die Länge der EDF bestimmt. Alle Verstärker in jedem Bus werden durch Pumpsignale von einer einzelnen, entfernt angeordneten Quelle, z. B. einem Laser, gepumpt. Die Koppler **406** und **426** sind vorzugsweise geschweißte Wellenlängenmultiplex-(WDM-)Faserkoppler, die so ausgeführt sind, daß die Pumpe nicht gekoppelt wird und nur in den Bussen **400** und **420** verbleibt, wogegen das Signal entlang des Verteilungsbusses **400** teilweise in eine Sprosse **404** eingekoppelt wird und der Rest an die nachfolgenden Sprossen durchgelassen wird. Alle Verstärker **422** und **424** sind in einem hohen Pumpensättigungszustand, so daß (1) ihre Rauschzahl niedrig ist und (2) die Pumpleistung, die nicht durch einen Verstärker verbraucht wird, an die nachfolgenden Verstärker übertragen wird. Die Pumpleistungsbilanz wird durch die Anforderung bestimmt, nämlich daß der letzte Verstärker in einer Kette eine ausreichende Pumpleistung aufnehmen muß. Fernpumpen einer einzelnen EDFA mit hoher Verstärkung ist bereits beschrieben worden und in einem Nachrichtenübertragungssystem implementiert. (Siehe beispielsweise E. Brandon, A. Gladston, A. und J. P. Blondel, "Cayman-Jamaica Fiber System: The Longest 2.5 Gbit/s Repeaterless Submarine Link Installed", OFC'97, Vol. 6, 1997 OSA Technical Digest Series, paper TuL1.) Wie nachstehend beschrieben wird, ist es gleichermaßen praktisch, eine Sensorgruppe, die aus dem Mehrfachen von zehn Verstärkern besteht, mit einer mäßigen Pumpleistung fernzupumpen.

[0139] Eine wichtige Betriebsanforderung an eine Sensorgruppe besteht darin, daß sie modular ist, was die Ausführung und die Pumpleistungsanforderung stark beeinflusst. Aus praktischen Gründen, z. B. wegen der Bedienung oder der Wartung einer Sensorgruppe auf einem Schiff, ist die Sensorgruppe vorzugsweise in leichte Segmente unterteilt und steckbar, so daß bei einem Defekt eines Segments defekte Segmente anstelle der ganzen Sensorgruppe ausgewechselt werden können. Somit sind alle Segmente, einschließlich der Verstärker, die sie enthalten, vorzugsweise identisch, so daß ein Standardsegment an jeder Stelle entlang der Sensorgruppe eingesetzt werden kann. Verstärker mit identischen Längen stellen jedoch keine genau identischen Verstärkungen bereit, da die nachgeschalteten Verstärker weniger Pumpleistung aufnehmen. Deshalb besteht die Tendenz, daß verschiedene Beträge an Pumpleistung von verschiedenen Sensoren zurückgegeben werden, und die Sensoren haben geringfügig ungleichmäßige Empfindlichkeiten. Mehrere Verfahren zum Ausgleichen dieser Empfindlichkeit aller Sensoren werden nachstehend beschrieben.

[0140] Um die Pumpleistungsbilanz für eine ganze verstärkte Sensorgruppe, z. B. für die Sensorgruppe, die in **Fig. 16** gezeigt ist, zu berechnen, muß zunächst der Leistungsverbrauch einer einzelnen Verstärkerstufe betrachtet werden. **Fig. 17** zeigt eine Stufe einer typischen verstärkten Sensorgruppe mit einer Sprosse **440**, einem Verteilungsverstärker **442**, einem Faserkoppler **446**, einem Verteilungsbus **450**, einem Rückführungsverstärker **444** und einem Faserkoppler **448** im Rückführungsbus **452**. L_x bezeichnet die Einfügungsdämpfung des Spleißes zwischen der erbiumdotierten Faser (EDF) und der Einmodenfaser (SMF). L_e bezeichnet die Hintergrunddämpfung der EDF. L_f bezeichnet die Durchgangsdämpfung der SMF. L_c bezeichnet die Einfügungsdämpfung des Kopplers **446**. Alle Parameter werden in der Pumpwellenlänge bewertet. Die Länge der EDFs im Verteilungsbus **450** ist so festgelegt, daß eine Verstärkung G_d ermöglicht wird, die die nachfolgenden Signaldämpfungen vor dem nächsten Verstärker genau kompensiert, nämlich $G_d = 1/[L_x^2 L_c (1 - C_d) L_f]$, wobei C_d das Verteilungsbuskopplungsfaktor ist und die mit Strichindex versehenen Parameter in der Signalwellenlänge bewertet werden. Eine ähnliche Beziehung gilt für den Rückführungsbusverstärker **444** mit der Verstärkung G_r , außer daß der Koppler **448** einen anderen Kopplungsfaktor C_r hat.

[0141] Die Abhängigkeit der Verstärkerverstärkung von der Pumpleistung ist in **Fig. 18** für verschiedene Eingangssignalleistungen dargestellt. Diese Kurven wurden anhand einer Computersimulation eines einzelnen Verstärkers ermittelt, der mit einer EDF hergestellt ist, die normalerweise typisch ist für Nachrichtenübertragungs-EDFAs. Die simulierte Faser hat einen Kernradius von 1,4 µm, eine numerische Apertur (NA) von 0,28, eine Er_2O_3 -Konzentration von 50 Mol-ppm und eine Länge von 3,5 m. Eine Signalwellenlänge von 1536 nm und eine Pumpwellenlänge von 1480 nm wurden verwendet. Die Eingangssignalleistungen, die in **Fig. 18** ge-

zeigt sind, schließen den in Betracht kommenden Bereich für diese Systeme ein. Der Verstärker hat eine Schwelleneingangspumpleistung von $P_p^{\text{th}} = 1,5 \text{ mW}$ ($G = 0 \text{ dB}$), und er stellt eine Kleinsignalverstärkung von 6,1 dB bei einer hohen Eingangspumpleistung bereit. Die obere Grenze für die Pumpleistung (1 W) wird durch praktische Überlegungen gesetzt, einschließlich der Kosten der Pump Laser und Nichtlinearitätseffekte, die auftreten, wenn größere Leistungen über mehrere Kilometer Zuführungsfaser und Busse übertragen werden. Die Zuführungsfasern sind normalerweise 1 bis 10 km lang und haben normalerweise eine Durchgangsdämpfung von 0,3 dB/km bei 1480 nm und 1,5 dB/km bei 980 nm. Deshalb ist es kritisch, wenn man eine Pumpquelle von 1480 nm für das Fernpumpen verwendet, so daß auch ein deutlicher Betrag an Pumpleistung tatsächlich die Verstärker erreicht.

[0142] Mit einer Pumpe höherer Leistung bei 1480 nm und einem Signal nahe 1550 nm, das sich in der gleichen Zuführungsfaser ausbreitet, erfährt das Signal eine Raman-Verstärkung. In der Zuführung zum Verteilungsbuss breiten sich die Pumpe und das Signal gemeinsam aus, und diese Verstärkung wäre sehr rauschbehaftet. Getrennte Zuführungsfasern werden also vorzugsweise verwendet. Dagegen breiten sich in der Zuführungsfaser zum Rückführungsbuss die Pumpe und das Signal in entgegengesetzter Richtung aus, und die Raman-Verstärkung ist rauscharm. Es kann also in der Zuführung eine Faser für den Rückführungsbuss verwendet werden.

[0143] Wenn eine Sensorgruppe entworfen wird, muß die durchschnittliche Signalleistung in jedem Bus bestimmt werden, und die Pumpleistungsbilanz für jeden Bus und die akzeptable Änderung der Verstärkung in allen Verstärker, da die Pumpleistung entlang der Sensorgruppe verbraucht wird. Wie bereits ausgeführt wird, ist eine Pumpdämpfung von annähernd 0,5 dB pro Sprosse ein angemessener Schätzwert. Wie oben ausgeführt wurde, ist eine Sensorgruppe von annähernd 20 Sprossen optimal. Als erste Schätzung ist also eine Gesamtpumpverlustbilanz von 10 dB angemessen, d. h. die Pumpleistung nimmt entlang der Sensorgruppe von 1 W bis 100 mW ab. Bei niedrigen Signalleistungen ($< 1 \text{ mW}$) nimmt die Verstärkung der Verstärker um weniger als 0,5 dB über diesen Pumpleistungsbereich ab (siehe **Fig. 18**). Da die durchschnittliche Signalleistung erhöht wird, nimmt diese Differenz der Verstärkung zu und erreicht bei einem Signal von 10 mW 2 dB. Da die Eingangspumpleistung Pumpleistungsbilanz erhöht wird, nimmt die Differenz der Leistung bei einer konstanten ab. Mit dem Diagramm, das in **Fig. 18** dargestellt ist, ist es möglich, eine minimale Eingangspumpleistung zu bestimmen, die erforderlich ist, um die Änderung der Verstärkung in allen Verstärker unter einer gewünschten Grenze zu halten.

[0144] Eine genauere Bestimmung der Pumpleistungsbilanz für eine einzelne Verstärkerstufe wird nachstehend beschrieben. Die Dämpfungsmechanismen, die bei der Pumpwellenlänge wirken, die in Verbindung mit **Fig. 17** beschrieben ist, sind u. a. die Absorption der Pumpleistung (P_{abs}) durch die Erbiumionen des Verstärkers, die Einfügungsdämpfung des Kopplers, die Einfügungsdämpfung der beiden Spleiße und die Durchgangsdämpfungen der EDF und der Busfaser. In einem stark gesättigten Regime steht der Betrag an Pumpleistung, der eine gegebene Verstärkerstufe P_{out} verläßt, mit der Pumpleistung P_{in} , die in diese Stufe eingegeben wird, in folgender Beziehung:

$$P_{\text{out}} = [(P_{\text{in}} \cdot L_x \cdot L_c) - P_{\text{abs}}] \cdot L_x \cdot L_c \cdot L_f \quad (20)$$

[0145] Diese Ausgangspumpleistung wird als die Eingangspumpleistung für den nachfolgenden Verstärker verwendet.

[0146] Die Pumpleistung, die in einer einzelnen Stufe verlorengeht ($P_{\text{in}} - P_{\text{out}}$), ist in **Fig. 19** dargestellt. Diese Kurven wurden anhand von Computersimulationen des gleichen Verstärkers ermittelt, wie oben beschrieben. Jeder der Pumpleistungsdämpfungsmechanismen kann einzeln betrachtet werden, beginnend mit der Leistung, die vom Verstärker für die Umwandlung in die Signalleistung absorbiert wird. Bei einem Eingangssignal mit einer durchschnittlichen Leistung von P_s fügt die EDFA dem Signal eine durchschnittliche Leistung von $(G - 1) \cdot P_s$ hinzu und verbraucht einen Betrag an Pumpleistung, der $(\lambda_s/\lambda_p) \cdot (G - 1) \cdot P_s$ entspricht, wobei λ_s die Signalwellenlänge und λ_p die Pumpwellenlänge ist. Diese Umwandlung ist unabhängig von der Eingangspumpleistung, vorausgesetzt, daß die Eingangspumpleistung P_p viel größer ist als P_p^{th} und P_s , so daß die absorbierte Pumpleistung für P_p , die größer ist als annähernd 100 mW, konstant ist (siehe **Fig. 18**). Jeder Verstärker erzeugt also eine verstärkte Spontanemission (ASE) und verstärkt die ASE, die in anderen Verstärkern entsteht. Einwegleiter, die die ASE beseitigen würden, die sich in der Richtung entgegen dem Signal ausbreitet, werden vorzugsweise nicht verwendet, da die erzeugten ASE-Leistungspegel auch bei Dutzenden von Verstärkern tolerierbar sind, und auch wegen der zusätzlichen Kosten. Daher breitet sich die ASE in beiden Richtungen in der gesamten Sensorgruppe aus. Ein einzelner Verstärker fügt der einfallenden ASE 2 bis 3 μW neue ASE-Leistung in beiden Richtungen hinzu und verstärkt die Gesamt-ASE. Entlang jedes Busses akkumuliert sich die ASE-Leistung linear mit der Anzahl der Verstärker, während die Pumpleistung, die in ASE-Leistung umgewandelt wird, mit dem Quadrat der Anzahl der Verstärker zunimmt. In der Pumpleistungsbilanz werden in der gesamten Sensorgruppe normalerweise weniger als wenige Milliwatt Pumpleistung in ASE-Leistung umgewandelt und sind daher vernachlässigbar.

[0147] Bei der gegenwärtigen Technologie ($L_c = 0,3$ dB bei einem geschweißten WDM-Faserkoppler von 1480/1550 nm) ist der größte Leistungsverlust für die Pumpleistung die WDM-Koppler-Einfügungsdämpfung, wie in **Fig. 19** gezeigt. Die geringe Kopplerdämpfung dominiert die hohe EDF-Absorption, da P_{abs} von P_p unabhängig ist, wenn P_p sehr hoch ist, während die Leistungsverlust infolge von L_c proportional P_p ist. Die Kopplerdämpfung hat die Tendenz, umgekehrt proportional Abstand der beiden multiplexierten Wellenlängen zu sein, so daß es bei relativ kleiner Differenz zwischen der Pump- und den Signalwellenlänge eine Herausforderung wäre, L_c deutlich zu reduzieren. Dies ist jedoch der Term, dessen Minimierung am kritischsten ist. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, besteht darin, die Anzahl der Koppler in jedem Bus zu reduzieren, d. h. die Anzahl der Sensoren pro Sprosse (j) zu maximieren. Aber wenn j zunimmt, nimmt die Verteilungsdämpfung, die jedes Signal in jeder Sprosse erleidet, um einen Faktor j zu (zwei Sternkoppler pro Sprosse, siehe **Fig. 16**). Ein Kompromiß zwischen der Kopplereinfügungsdämpfung für die Pumpe im Bus und die Verteilungsdämpfungen für das Signal in einer Sprosse muß daher gefunden werden.

[0148] Die zweitgrößte Pumpleistungsverlust entsteht durch die beiden Spleiße zwischen der EDF und der Busfaser. Solche Spleiße haben die Tendenz, eine größere Einfügungsdämpfung zu haben als die SMF-SMF-Spleiße wegen der Nichtübereinstimmung des Modenfelddurchmessers zwischen der EDF und der SMF. Die Busfaser ist eine normale SMF mit geringer NA (normalerweise 0,12) und einer großen Modenfläche. Dies ist kritisch für eine niedrige Durchgangsdämpfung (eine gute SMF erreicht bei 1550 nm eine Durchgangsdämpfung von weniger als 0,2 dB/km) und für eine Minimierung der Nichtlinearitätseffekte. Dagegen wird bei der EDF eine höhere NA (normalerweise mehr als 0,20) bevorzugt, um die Verstärkerpumpleistungsanforderung zu verringern. Gegenwärtig können gute handelsübliche Fusionspleißgeräte EDF-SMF-Spleiße mit einer normalen Einfügungsdämpfung von $L_x = 0,05$ dB pro Spleiß bei 1550 nm im Vergleich zu 0,02 dB bei SMF-SMF-Spleißen herstellen. (Siehe beispielsweise W. Theng, O. Hultén, R. und Rylander, "Erbium-Doped Fiber Splicing and Splice Loss Estimation", Journal of Lightwave Technology, Vol. 12, März 1994, 430–435.) Der Pumpleistungsverlust durch die beiden EDF/SMF-Spleiße (jeweils 0,05 dB) ist in **Fig. 19** gezeigt.

[0149] Der dritte Pumpleistungsverlustmechanismus ist die Faserdurchgangsdämpfung. Die letztere hat die Tendenz, mit der NA der Faser exponentiell zuzunehmen. (Siehe beispielsweise L. B. Jeunhomme, Single-Mode Fiber Optics, 2nd, ed., Marcel Dekker, New York, 1990, S. 101.) Die Hintergrunddämpfung pro km hat die Tendenz, bei einer EDF größer zu sein als bei einer normalen SMF. Eine EDF mit einer hohen NA (größer als 0,30) hat normalerweise eine Hintergrunddämpfung, die bei 1550 nm größer ist als 3,5 dB/km im Vergleich zu weniger als 0,5 dB/km bei einer EDF mit einer geringen NA (weniger als 0,17). Die Busfaser zwischen den Verstärkern trägt auch zur Durchgangsdämpfung bei. Eine Sensorgruppe hat normalerweise 2 bis 4 m Faser zwischen den Sensoren und 8 bis 16 Sensoren pro Sprosse oder $L_f \approx 0,01$ dB. Die untere Kurve in **Fig. 19** wurde für eine Hintergrunddämpfung von $L_e = 0,01$ dB (3 dB/km Dämpfung und 3,5 m EDF) und $L_f = 0,01$ dB dargestellt. Es ist hier keine Zuführungsfaser angenommen worden. Wenn jedoch eine Zuführung verwendet wird, die normalerweise 1 bis 10 km lang ist, muß die Durchgangsdämpfung der Zuführung berücksichtigt werden.

[0150] Bisher ist eine konstante durchschnittliche Signalleistung von 5 mW angenommen worden. **Fig. 20** zeigt die Auswirkung der Signalleistung auf den Gesamtpumpleistungsverlust. Es sind Kurven für jede der vier Eingangssignalleistungen dargestellt. Jede Kurve zeigt den Gesamtpumpleistungsverlust gegen Eingangspumpleistung für eine einzelne Verstärkerstufe. Zum Vergleich zeigt die gestrichelte Kurve den Pumpleistungsverlust, der allein im Koppler entsteht. Über der Eingangspumpleistung von 100 mW sind die durchgezogenen Kurven parallel, was zeigt, daß die EDFA-Leistungsumwandlung von der Pumpleistung über einem bestimmten Pegel unabhängig und proportional zu der Eingangssignalleistung ist, wie bereits beschrieben. Bei einer hohen durchschnittlichen Signalleistung (10 mW) und einer niedrigen Eingangspumpleistung (< 300 mW) zeigt ein Vergleich zwischen der Kurve von 10 mW und der Kurve von 0 mW, daß die Absorption der Pumpleistung durch die Verstärker größer ist als die Summe aller anderen Dämpfungsterme. Um die Pumpleistungsbilanz weiter zu reduzieren, kann die durchschnittliche Signalleistung reduziert werden, aber dadurch wird das SNR direkt reduziert.

[0151] Der letzte Dämpfungsmechanismus, der berücksichtigt werden muß, entsteht in den Verbindern. Wie bereits ausgeführt, ist die Sensorgruppe vorzugsweise segmentiert und steckbar, und die Verbinder sind in einer rauen Umgebung bei typischen Anwendungen (z. B. im Ozean) vorzugsweise robust. Die Pumpleistungsbilanz sollte unempfindlich sein gegen erhebliche und variable Dämpfungen in den Verbindern. Ein guter Verbinder kann eine Einfügungsdämpfung von immerhin nur 0,2 dB haben, und eine Sensorgruppe kann aus bis zu 50 Segmenten bestehen. Dies fügt der Pumpleistungsbilanz Verluste bis zu 10 dB pro Sensorgruppe hinzu und erhöht die Signalverlustbilanz um bis zu 20 dB (in beiden Richtungen).

[0152] Angesichts der Pumpleistungsbilanz für einen einzelnen Verstärker kann eine Bilanz für die ganze Sensorgruppe von Verstärkern aufgestellt werden, von denen alle von einer einzigen Quelle am vorderen Ende gepumpt werden. Anhand der Gleichung 20 wird die Pumpleistung P_k , die in den k -ten Verstärker einfällt, auf die Pumpleistung P_{k-1} bezogen, die von dem vorherigen ($(k-1)$ -ten) Verstärker übertragen wird, nämlich durch:

$$P_k = [(P_{k-1} \cdot L_x \cdot L_c) - P_{abs}] \cdot L_x \cdot L_c \cdot L_f \quad (21)$$

wobei P_{abs} eine Funktion der Signalleistung ist, die in den k -ten Verstärker einfällt. Die Eingangspumpleistung P_1 muß so groß sein, daß die Pumpleistung P_n , die den letzten Verstärker erreicht, größer ist als ein bestimmter minimaler Wert. Der letztere wird festgelegt, um sicherzustellen, daß der letzte Verstärker eine ausreichende Verstärkung aufweist, d. h. er muß viel größer sein als P_p^{th} und P_s . Wenn P_n erhöht wird, empfangen alle Verstärker mehr Pumpleistung, und die Verstärkung in allen Verstärkern ist gleichmäßiger (siehe **Fig. 18**), und daher sind die zurückgeführten Signalleistungen in der Sensorgruppe gleichmäßiger. Daher wird P_n so festgesetzt, daß die Schwankung der Verstärkung zwischen allen Verstärkern unter einem bestimmten gewünschten Pegel bleibt. Ihrerseits bestimmt P_n die Pumpleistung, die dem ersten Verstärker P_1 zugeführt werden muß. In dieser Analyse ist P_n gleich 100 mW gesetzt, was mehrfach größer ist als entweder die Verstärkerschwelleistung oder die durchschnittliche Signalleistung.

[0153] **Fig. 21** zeigt die Entwicklung der Pumpleistung, die in jeden Verstärker einfällt, entlang der Sensorgruppe von 13 Verstärkern unter Verwendung der Gleichung 21, und die Verlustbilanz, die ausführlich in **Fig. 19** dargestellt ist. Die Parameter, die für **Fig. 21** verwendet werden, sind eine Eingangssignalleistung von 5 mW, eine Signalwellenlänge von 1536 nm, eine Pumpwellenlänge von 1480 nm, 15 Sensoren pro Sprosse, eine Einfügungsdämpfung pro Sensor von 5 dB, ein Verteilungsbuskopplungsfaktor C_d von 80% und ein Rückführungsbuskopplungsfaktor C_r von 50%. Die letzten beiden Werte sind so gewählt, daß die Rauschzahl minimiert wird, wie oben beschrieben. Beide Kurven werden von der Kopplereinfügungsdämpfung dominiert. Die erforderliche Eingangspumpleistung ist 1100 mW für den Verteilungsbus und 450 mW für den Rückführungsbus (siehe **Fig. 21**). Die Differenz dieser beiden Anforderungen ist eine größere Umwandlung von Pumpleistung in Signalleistung im Verteilungsbus, wegen der größeren durchschnittlichen Signalleistung und dem größeren Kopplungsfaktor in diesem Bus. Die erforderliche kombinierte Eingangspumpleistung ist etwa 1,5 W, was ein vertretbarer Wert ist, der ohne weiteres bei mantelgepumpten, hintereinander geschalteten Raman-Faserlasern erreichbar ist. (Siehe beispielsweise S. G. Grubb, T. Strasser, W. Y. Cheung, W. A. Reed, V. Mizrahi, T. Erdogan, P. J. Lemave, A. M. Vengsarkar, D. J. DiGiovanni, D. W. Peckham und B. H. Rockney, "High-Power 1.48 μm Cascaded Raman Laser in Germanosilicate Fibers, Technical Digest Optical Amplifiers and Their Applications, 1995, S. 197–199.)

[0154] **Fig. 22** zeigt das SNR gegen Sensoranzahl bei der Sensorgruppe, die in **Fig. 21** modelliert ist. Das SNR für alle Sensoren ist größer als 120 dB. Die Sensoren an beiden Enden der Sensorgruppe geben den geringsten Betrag an Signalleistung zurück, und die Sensoren in der Mitte geben den größten Betrag zurück. Die Sensoren an beiden Enden haben also das niedrigste SNR, und die Sensoren in der Mitte haben das höchste SNR. Die Differenz des SNR zwischen dem besten und dem schlechtesten Sensor ist nur 4,3 dB, was für die meisten Anwendungen ausreichen sollte. Verschiedene Möglichkeiten zur Bereitstellung größerer Gleichmäßigkeit des SNR über die Sensorgruppe werden jedoch nachstehend ausgeführt.

[0155] Wenn die Verwendung einer hohen Pumpleistung für eine Minimierung der Verstärkungsabweichungen in der Sensorgruppe nicht praktisch ist, dann muß ein zusätzliches Verfahren verwendet werden. Ein solches Verfahren besteht darin, ein Bragg-Gitter am hinteren Ende jedes Busses hinzuzufügen, um die Pumpe zu reflektieren (siehe **Fig. 23b**, nachstehend beschrieben). Dadurch wird Pumpleistung wieder verwertet, die vom letzten Verstärker in jedem Bus nicht verbraucht wird, und der Betrag an Pumpleistung, der in die letzten wenigen Verstärker einfällt, wird erhöht. Obwohl dies ein effektives und wirtschaftliches Schema ist, ermöglicht es nur eine kleine Verbesserung in bezug auf die Korrektur des SNR aller Sensoren.

[0156] Ein zweites Verfahren besteht darin, geringfügig längere Verstärkerlängen für nachfolgende EDFAs zu verwenden. Die Länge jedes Verstärkers ist so festgelegt, daß sich eine richtige Verstärkung entsprechend der vorhergesagten einfallenden Pumpleistung ergibt. Dieses Verfahren erreicht die niedrigsten Abweichungen der Verstärkung in bezug auf die Pumpleistung in der Sensorgruppe und die größte Gleichmäßigkeit der Empfindlichkeit pro Sensor in der Sensorgruppe, allerdings auf Kosten der vollen Modularität.

[0157] Ein drittes Verfahren besteht darin, die Vorwärtskopplungstopologie, die in **Fig. 23a** gezeigt ist, zu verwenden. (Siehe beispielsweise K. P. Jackson und H. J. Shaw, "Fiber-Optic Delay-Line Signal Processing", in Optical Signal Processing, J. L. Homer, ed., Academic Press, San Diego, CA, 1987, S. 431–476; und A. D. Kersey, A. Dandridge, A. R. Davis, C. K. Kirdendall, M. J. Marrone und D. G. Gross, "64-Element Time-Division Multiplexed Interferometric Sensor Array with EDFA Telemetry", OFC'96, Vol. 2, 1996 OSA Technical Digest Series, paper ThP5.) Der Hauptunterschied zu **Fig. 16** besteht darin, daß das optische Eingangssignal in das hintere Ende des Verteilungsbusses **460** eingegeben wird und sich vorwärts ausbreitet, zum vorderen Ende der Sensorgruppe **462**, sowohl im Verteilungsbus **460** als auch im Rückführungsbus **464**, wo die beiden Busse durch Sprossen **468** verbunden sind. Wenn n Verstärker **466** pro Bus vorhanden sind, dann läuft ein Signal, das durch die Sprosse k ausbreitet, durch k Verstärker im Verteilungsbus **460** und $(n - k + 1)$ Verstärker im Rückführungsbus **462**, d. h. insgesamt durch $(n + 1)$ Verstärker. Alle Signale laufen also durch die gleiche Anzahl von Verstärkern. In der vorherigen Topologie, die hier mit Rückkopplung bezeichnet ist (**Fig. 16**), laufen Signale von den Sensoren der ersten Sprosse nur durch zwei Verstärker, während die Signale von den Sensoren der letzten Sprosse durch alle Verstärker in beiden Bussen laufen (nämlich durch $2n$ Verstärker). Bei beiden Sensorgruppentopologien akkumuliert sich die ASE mit der gleichen Rate, und daher gilt die Gleichung

13 auch für die Vorwärtskopplungstopologie. Bei beiden Topologien wird die Pumpleistung für die Verstärker vom vorderen Ende zugeführt, so daß die Verstärker am vorderen Ende den größten Betrag an Pumpleistung empfangen und die Verstärker am hinteren Ende den geringsten Betrag an Pumpleistung empfangen. Die Pumpleistung wird entlang jedes Busses auf die gleiche Weise verbraucht, und die Verstärkung jedes Verstärkers ändert sich mit der Pumpleistung auf die gleiche Weise. Im Falle der Rückwärtskopplung besteht jedoch die Tendenz, daß sich die Abweichungen der Verstärkungen akkumulieren und die rückgeleitete Signalleistung von jedem Sensor nicht die gleiche ist. Im Falle der Vorwärtskopplung dagegen besteht die Tendenz, daß sich kleine Gesamtverstärkungen oder kleine Gesamtdämpfungen pro Sprosse aufheben, so daß der kumulative Gewinn oder Verlust für jeden optischen Weg im optischen Sensor stark reduziert wird. Die Leistung, die von allen Sensoren zurückgeführt wird, hat also die Tendenz, in der Sensorgruppe gleichmäßig zu sein.

[0158] Es gibt zwei Nachteile bei der Vorwärtskopplungssensorgruppe. Der erste Nachteil besteht darin, daß eine zusätzliche Busfaser erforderlich ist, um das Signal an das hintere Ende der Sensorgruppe zu bringen. Es sind also drei Busfasern pro Sensorgruppe vorhanden, und jeder Verbinder erfordert eine zusätzliche Faserverbindung, was die Größe, das Gewicht und die Kosten erhöht. Der zweite Nachteil besteht darin, daß dem einen Bus Verzögerungsleitungen **470** hinzugefügt werden müssen, wie in **Fig. 23a** gezeigt. Bei beiden Topologien ist die maximale Zeit, die zum Abfragen eines Sensors verfügbar ist, gleich der Differenz der Weglänge für das Signal, das durch einen Sensor läuft, verglichen mit dem benachbarten Sensor. Bei der Rückkopplungstopologie (**Fig. 16**) stellt der Abstand der Sensoren eine spezifische Wegdifferenz dar. Bei der Vorwärtskopplungstopologie (**Fig. 23a**) gibt es keine spezifische Wegdifferenz zwischen den Sensoren. Daher muß einem (und nur einem) Bus eine Verzögerungsfaser hinzugefügt werden, um eine Weglängendifferenz zu erzeugen und ein Zeitfenster zum Abtasten eines Sensors bereitzustellen (wie im Rückführungsbus in **Fig. 23a** gezeigt). Wenn beispielsweise ein Zeitfenster von 14,6 ns erforderlich ist, muß eine zusätzliche Faser von 3 m hinzugefügt werden. Beide Nachteile führen dazu, daß das Signal eine längere Weglänge hat, so daß L_r größer ist, und Nichtlinearitätseffekte größer sind.

[0159] **Fig. 23b** zeigt eine Sensorgruppe, die der in **Fig. 23a** in dem Sinne gleicht, daß alle Signale durch die gleiche Anzahl von Verstärkern laufen. Die Pumpleistung für den Verteilungsbus **490** und den Rückführungsbus **492** sowie ein Eingangssignal treten in den vorderen Teil der Vorrichtung ein. Außerdem sind Bragg-Gitter **480** vorhanden, um unverbrauchte Leistung am Ende jedes Busses **490** und **492** zu reflektieren.

[0160] **Fig. 24** zeigt das SNR gegen die Sensoranzahl bei der Sensorgruppe in **Fig. 23a**, allerdings mit 90% Pumpreflektoren am hinteren Ende jedes Busses, z. B. solche, die in **Fig. 23b** gezeigt sind, und unter Verwendung der gleichen Sensorgruppenparameter, wie in **Fig. 21** und **22**, nur mit deutlich weniger Pumpleistung, insbesondere mit $P_p = 700$ mW (Verteilungsbus) und $P_p = 300$ mW (Rückführungsbus). Das SNR für alle Sensoren ist größer als 120 dB. Alle Sensoren geben nahezu identische Beträge an Signalleistung zurück und weisen somit nahezu identische SNRs auf. Die Differenz des SNR zwischen dem besten und dem schlechtesten Sensor beträgt nur 1,3 dB, was kleiner ist als die Differenz des SNR in **Fig. 22**.

[0161] Ein viertes Verfahren zur Reduzierung der Abweichung der Verstärkung pro Verstärker entlang der Sensorgruppe ist bidirektionales Pumpen, wie in **Fig. 25** bei der Vorwärtskopplungstopologie gezeigt. Die Sensorgruppe umfaßt einen Verteilungsbus **490** mit einer Vielzahl von Verteilungsbusverstärkern **492** und einen Rückführungsbus **491** mit einer Vielzahl von Rückführungsbusverstärkern **493**. Eine Vielzahl von Sprossen **494** ist zwischen den beiden Bussen **490**, **491** angeordnet. Das gleiche bidirektionale Pumpschema kann bei der Rückkopplungstopologie implementiert werden. Durch Pumpen von beiden Enden eines Verteilungsbusses **490** empfangen die Verstärker **492** sowohl am vorderen als auch am hinteren Ende die höchste Pumpleistung, während die Verstärker in der Mitte die niedrigste Pumpleistung empfangen. Ferner ist die Differenz der Pumpleistung zwischen den Verstärkern am Ende und in der Mitte viel geringer als bei den unidirektional gepumpten Sensorgruppen (**Fig. 16** und **23a**), und die Differenz der Verstärkung pro Verstärker zwischen den Verstärkern am Ende und in der Mitte wird somit reduziert. Dieses Verfahren hat auch die Tendenz, die Gesamtpumpleistungsbilanz zu reduzieren. Der Preis für das bidirektionale Pumpen ist eine zusätzliche Busfaser, um Pumpleistung zum hinteren Ende der Sensorgruppe zu übertragen, und ein Koppler von 3 dB, um die Pumpleistung in beide Busse zu verteilen, nämlich in drei Busfasern pro Sensorgruppe bei Rückkopplung oder in vier Busfasern bei Vorwärtskopplung. In jedem Verbinder ist eine zusätzliche Faserverbindung vorhanden, die wiederum die Größe, das Gewicht und die Kosten erhöht. Außerdem hat die Pumpe eine längere Weglänge, so daß Durchgangsdämpfungen und Nichtlinearitätseffekte für die Pumpe größer sind.

[0162] Um die Leistungsfähigkeit dieser Sensorgruppen zu optimieren, wird die Pumpleistungsanforderung vorzugsweise minimiert, während das SNR aller Sensoren maximiert wird. Die Hauptparameter, die sowohl die Leistungsanforderung als auch die Rauschzahl bestimmen, sind die Kopplungsfaktoren C_d und C_r und die Anzahl der Sensoren pro Sprosse j oder ihr Komplement, was der Anzahl der Verstärker pro Bus oder Sprosse pro Sensorgruppe n entspricht, wie bereits beschrieben. **Fig. 26** zeigt die berechnete Abhängigkeit der Rauschzahl (NF) und der Eingangspumpleistungsanforderung (P_p) des C_d . Die vier Kurvenpaare modellieren verschiedene Kombinationen von n und j derartig, daß die Gesamtanzahl der Sensoren annähernd konstant ist ($N \approx 200$). Der Rückführungsbuskopplungsfaktor C_r wurde auf 50% festgelegt, was die NF nahezu minimiert,

wie bereits beschrieben. Wenn C_d zunimmt, nimmt die NF beständig ab, während P_p gleichzeitig zunimmt. Die Zunahme erfolgt schnell, wenn C_d groß ist. Bei $j = 10$ und $n = 20$, was die optimale Konfiguration darstellt, die bestimmt worden ist, wie bereits beschrieben, ist die Rauschzahl besser, aber die Pumpleistung höher als in allen anderen Fällen. Umgekehrt ist bei $j = 20$ und $n = 10$ die Rauschzahl höher, aber die Pumpleistung niedriger als in allen anderen Fällen. Wenn also bei einem festen C_d die Anzahl der Sensoren pro Sprosse erhöht wird und die Anzahl der Verstärker pro Bus verringert wird, verbessert sich die Pumpleistungsanforderung auf Kosten einer verschlechterten Rauschzahl. Wenn C_d geringfügig erhöht wird, ist es möglich, die Zunahme der Rauschzahl zu kompensieren und dennoch die Pumpleistungsanforderung zu reduzieren.

[0163] **Fig. 26** zeigt, daß bei einer Sensorgruppe mit 200 Sensoren bei der optimalen Konfiguration, die oben ausgeführt ist ($j = 10$ und $n = 20$) die NF bei $C_d = 80\%$ gleich 39 dB ist, aber die Verteilungsbuspumpleistungsanforderung größer ist als 2 W. Dagegen nimmt bei $j = 15$ und $n = 13$ die NF um 1 dB zu, aber die Verteilungsbuspumpleistungsanforderung fällt auf 950 mW, was ein vertretbarer Betrag ist und bei mantelgepumpten Faserlasern möglich ist. Wenn C_d auf 85% erhöht wird, wird der NF-Nachteil beseitigt, und die Verstärkung G_d muß um 1,25 dB erhöht werden, und die Pumpleistungsanforderung ist dann 1,2 W. Da die Anzahl der Sensoren pro Sprosse j über das oben beschriebene Optimum hinaus erhöht wird ($j = 10$ und $n = 20$), nimmt die Rauschzahl bei festem C_d zu (siehe **Fig. 12**). Und wenn j zunimmt, nimmt die Pumpleistungsanforderung bei einem festen C_d ab. Die minimale Pumpleistungsanforderung tritt bei einem Verstärker pro Bus auf ($n = 1$ und $j = N$), aber die Rauschzahl wird unakzeptabel hoch.

[0164] Um weitere Hilfestellung bei der Auffindung eines Kompromisses zwischen der Rauschzahl und der Pumpleistungsanforderung zu geben, zeigt **Fig. 27** die NF gegen die erforderliche Pumpleistung. Diese Kurven wurden direkt von **Fig. 26** abgeleitet, wo C_d entlang jeder Kurve zunimmt und die verschiedenen Kurven für die gleichen Kombinationen von j und n gelten, wie oben beschrieben. Diese Kurven zeigen, daß die Pumpleistungsanforderung weiter abnimmt, wenn die Anzahl der Sensoren pro Sprosse zunimmt. Die Anzahl der Verstärker pro Bus wird auch minimiert. Außerdem nimmt die Rauschzahl weiter ab, wenn C_d zunimmt (siehe **Fig. 26**), so daß die Verstärkung jedes Verstärkers maximiert werden muß. Aber die Pumpleistungsanforderung nimmt bei großem C_d schnell zu, da größere Beträge der Pumpleistung in Signalleistung umgesetzt werden. Bei dem Fernpumpschema besteht also eine Grenze in Bezug auf die mögliche Größe von C_d . Wenn Fernpumpen nicht kritisch ist und wenn die Betriebsanforderung an die Sensorgruppe, keine elektrischen Verbindungen zu haben, gemildert werden kann, könnte jeder Verstärker mit seiner eigenen Pumpdiode versorgt werden. Jeder Verstärker könnte also eine höhere Verstärkung haben, als bei dem Fernpumpschema praktisch ist, und es könnte eine niedrigere NF erreicht werden.

[0165] Bei der zweiten Gruppe von Kurven, die in **Fig. 28** gezeigt ist, sind NF und P_p gegen C_r dargestellt. Die vier Kurvenpaare modellieren die gleichen Kombinationen aus n und j wie in **Fig. 26**, wiederum mit $N \approx 200$. Für jede Kurve wird der Wert des C_d gewählt (aus **Fig. 26**), so daß NF = 40 dB für alle Kurven gilt, wenn $C_r = 50\%$. Wenn C_r zunimmt, nimmt P_p wie beim Verteilungsbus auch zu. Bei $j = 10$ und $n = 20$ ist die Pumpleistung schlechter als in den anderen Fällen, was auch für **Fig. 26** galt. Bei $j = 20$ und $n = 10$ ist die Pumpleistung niedriger als in den anderen Fällen, wie es in **Fig. 26** der Fall war. Bei $j = 15$ und $n = 13$ ist die Rückführungsbuspumpleistungsanforderung 400 mW, was ein sehr vertretbarer Betrag ist.

[0166] **Fig. 26** und **28** zeigen zwei in Betracht kommende Bereiche für das Pumpleistungsverhalten. Im ersten Bereich, wo das Kopplungsfaktor niedrig ist, ist die Pumpleistungsanforderung ziemlich konstant. Die passiven Komponentendämpfungen bei der Pumpwellenlänge dominieren die Pumpleistungsbilanz, d. h. die Leistungsverluste verbrauchen deutlich mehr Pumpleistung als die Erbiumionen. Im zweiten Bereich, wo der Kopplungsfaktor hoch ist, nimmt die Pumpleistungsanforderung schnell zu. Der Verbrauch an Pumpleistung durch die Verstärker dominiert die Pumpleistungsbilanz, da die Verstärker beträchtliche Beträge an Pumpleistung in Signalleistung umwandeln, wobei die Koppler kompensiert werden.

[0167] Um die Leistungsanforderung zu reduzieren, muß ein Kompromiß zwischen der Pumpleistungsbilanz und dem Signal/Rausch-Verhältnis gefunden werden. Wenn die Anzahl der Verstärker pro Bus um annähernd 1/3 gegenüber den bereits beschriebenen optimalen Konfigurationen reduziert wird ($j = 10$ und $n = 20$), kann die Pumpleistungsbilanz um mehr als 50% reduziert werden, wobei sie auf praktische Pegel herabgesetzt wird, während die NF nur geringfügig erhöht wird (1,5 dB). Die Erhöhung der Signalleistung, die einer Sprosse durch Erhöhung des Verteilungsbuskopplungsfaktors zugeführt wird, mildert den Anstieg der NF und erhöht die Pumpleistungsanforderung geringfügig. Ein Paar Faserbusse können somit 300 hochempfindliche (1 μ rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$) Sensoren mit einer Pumpleistung von annähernd 1 W unterstützen.

[0168] Die Erfindung wird nun im Kontext ihrer allgemeinsten Anwendungen beschrieben. **Fig. 29** zeigt eine generische Sensorgruppe **500** zur Fernanwendung mit Verstärkern **501**, **502** und Sensoren **503**. Ein vorderes Ende **504** (Abschnitt des Systems an Land oder auf einem Schiff umfaßt optische Quellen **505** und einen Empfänger **506**. Ein hinteres Ende **507** (im Wasser) umfaßt die Sensoren **503** und die Verstärker **502**. Eine Zuführung **508** verbindet das vordere Ende **504** mit dem hinteren Ende **507**.

[0169] **Fig. 30** zeigt eine umfassende Hydrophonanordnung **520** mit 1000 Sensoren **522** mit Sensorgruppen **524** von jeweils 250 Sensoren. Alle 1000 Sensoren **522** werden von einem Kabel mit acht Fasern unterstützt,

das einen Durchmesser von weniger als 3 cm haben kann. Acht Pumplaser **526** und vier Signallaser **528** sind erforderlich. Als Alternative ist es möglich, daß die vier Sensorgruppen **524** einen Signallaser gemeinsam benutzen. Vier Empfänger **530** werden verwendet, was eine deutliche Einsparung der Kosten, des besonderen Flächenbedarfs und Volumens (z. B. an Bord eines Schiffes) im Vergleich zu Hunderten von Empfängern sein kann, die in einem passiven System erforderlich sind.

Patentansprüche

1. Optische-Sensor-Architektur, umfassend:

eine Vielzahl von Sensoren (**110**), die ein optisches Eingangssignal empfangen und die gestörte optische Signale im Ansprechen auf einen erfassten Parameter ausgeben;
wenigstens eine optische Faser und eine Vielzahl von Kopplern (**140**, **142**), die ein optisches Signal an jeden Sensor verteilen, und die ein gestörtes optisches Signal von jedem Sensor (**110**) zurückführen; und
eine Vielzahl von optischen Verstärkern (**130**, **132**), die an gewählten Positionen entlang der Länge der wenigstens einen optischen Faser verteilt sind;

dadurch gekennzeichnet, dass jeder optischer Verstärker (**130**, **132**) eine individuell gewählte Verstärkung aufweist und dass jeder Koppler (**140**, **142**) ein individuell gewähltes Kopplungsverhältnis aufweist, wobei die Verstärkungen und die Kopplungsverhältnisse gewählt sind, um eine Systemrauschzahl, definiert als ein Verhältnis eines Signal-zu-Rausch-Verhältnisses des optischen Eingangssignal zu einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis eines optischen Signals in einem Sensor (**110**), der ein niedrigstes Signal-zu-Rausch-Verhältnis aufweist, zu optimieren.

2. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 1, wobei:

die wenigstens eine optische Faser eine Verteilungsfaser (**100**), die das optische Eingangssignal an die Sensoren (**110**) ausbreitet, und eine Rückführungsfaser (**100**), die die gestörten optischen Signale von den Sensoren (**110**) empfangen, umfasst; und
die Vielzahl von Verstärkern (**130**, **132**) einen ersten Satz von Verstärkern (**130**) in der Verteilungsfaser (**100**) und einen zweiten Satz von Verstärkern (**132**) in der Rückführungsfaser (**120**) umfasst.

3. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 2, wobei ein Kopplungsverhältnis zwischen jedem Sensor (**110**) und der Verteilungsfaser (**100**) zwischen ungefähr 0,2 und 0,4 ist.

4. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 2, wobei ein Wellenlängen-Teilungs-Multiplexer (**140**) verwendet wird, um jeden Sensor (**110**) mit der Verteilungsfaser (**100**) zu koppeln und ein Wellenlängen-Teilungs-Multiplexer (**142**) verwendet wird, um jeden Sensor (**110**) mit der Rückführungsfaser (**120**) zu koppeln.

5. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 1, wobei:

die wenigstens eine optische Faser das optische Eingangssignal an die Sensoren (**110**) in einer ersten Richtung ausbreitet und die gestörten optischen Signale von den Sensoren (**110**) in einer zweiten Richtung, entgegengesetzt zu der ersten Richtung, ausbreitet; und
die Vielzahl von Verstärkern (**130**, **132**) einen einzelnen Satz von Verstärkern in der wenigstens einen optischen Faser umfasst, wobei die Vielzahl von Verstärkern (**130**, **132**) das optische Eingangssignal, welches sich in der wenigstens einen optischen Faser in der ersten Richtung ausbreitet, verstärken und die gestörten optischen Signale, die sich in der wenigstens einen optischen Faser in der zweiten Richtung ausbreiten, verstärken.

6. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 1, wobei die wenigstens eine optische Faser umfasst:

einen Verteilungsbus (**100**), der ein optisches Eingangssignal empfängt und verteilt, wobei der Verteilungsbus (**100**) ein Verteilungsbus-Pumpsignal ausbreitet;
einen Rückführungsbus (**120**), der eine Vielzahl von optischen Rückführungssignalen empfängt und die optischen Rückführungssignale als Ausgangssignale bereitstellt, wobei der Rückführungsbus (**120**) ein Rückführungsbus-Pumpsignal ausbreitet;
eine Vielzahl von Stufen, die zwischen den Verteilungsbus (**100**) und den Rückführungsbus (**120**) gekoppelt sind, wobei jede Stufe wenigstens einen Sensor (**110**) umfasst, der einen jeweiligen Abschnitt des optischen Eingangssignals empfängt und der eines der optischen Rückführungssignale erzeugt; und
die Vielzahl von optischen Verstärkern umfasst:
eine Vielzahl von optischen Eingangsverstärkern (**130**) in dem Verteilungsbus (**100**) die auf das Verteilungsbus-Pumpsignal ansprechen, wobei die optischen Eingangsverstärker (**130**) das optische Eingangssignal verstärken und Verstärkungen aufweisen, die das optische Eingangssignal auf dem gewählten Signalpegel für jede der Stufen halten;

eine Vielzahl von optischen Ausgangsverstärkern (**132**) in dem Rückführungsbus (**120**), die auf das Rückführungsbus-Pumpsignal ansprechen, wobei die optischen Ausgangsverstärker (**132**) die Rückführungssignale verstärken, die von den Sensoren in den Stufen erzeugt werden, und Verstärkungen aufweisen, die im wesentlichen gleich zu den Größen der optischen Rückführungssignale sind.

7. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 6, wobei die Verstärkungen der Verstärker (**130**, **132**) größer werden, wenn sie von einer größeren Pumpenergie gepumpt werden, und das Verteilungsbus-Pumpsignal und das Rückführungsbus-Pumpsignal in jeweilige Enden des Verteilungsbusses (**110**) und des Rückführungsbusses (**120**) eintreten, wobei das Verteilungsbus-Pumpsignal ein ungleiches Pumpen der optischen Eingangsverstärker (**130**) und Differenzen in den jeweiligen Verstärkungen der optischen Eingangsverstärker (**130**) verursacht, wobei das Rückführungsbus-Pumpsignal ein ungleiches Pumpen der optischen Ausgangsverstärker (**132**) und Differenzen in den jeweiligen Verstärkungen in den optischen Ausgangsverstärkern (**132**) verursacht, die optischen Eingangsverstärker (**130**), die optischen Ausgangsverstärker (**132**) und die Stufen derart angeordnet sind, dass die Architektur eine Vielzahl von optischen Pfaden definiert, die unterschiedliche Kombinationen der optischen Eingangsverstärker (**130**) und der optischen Ausgangsverstärker (**132**), die jeweilige kumulative Verstärkungen aufweisen, einschließen, wobei die optischen Eingangsverstärker (**130**) und die optischen Ausgangsverstärker (**132**) Verstärkungen aufweisen, die so gewählt sind, dass die Differenzen in den kumulativen Verstärkungen zwischen den optischen Pfaden verringert werden, wodurch die Rauschzahl der Architektur reduziert wird.

8. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 7, bei der die Verstärker (**130**, **132**) entlang der Busse (**100**, **120**) derart positioniert sind, dass die optischen Pfade eine gleiche Anzahl von Verstärkern einschließen.

9. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 8, wobei das optische Eingangssignal in den Verteilungsbus (**100**) an dem Ende gegenüberliegend dem jeweiligen Ende des Verteilungsbusses (**100**) eintritt, und die optischen Rückführungssignale von dem jeweiligen Ende des Rückführungsbusses (**120**) heraus kommen.

10. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 8, wobei das optische Eingangssignal in das jeweilige Ende des Verteilungsbusses (**100**) eintritt, und die optischen Rückführungssignale und das Rückführungsbus-Pumpsignal an einem Ende gegenüberliegend zu dem jeweiligen Ende des Rückführungsbusses (**120**) heraus kommen.

11. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 7, bei der die jeweiligen Verstärkungen der Verstärker (**130**, **132**) eingestellt sind, um Verluste innerhalb der Optischen-Sensor-Architektur zu kompensieren, um eine Transmission von nahezu Eins entlang der Busse (**100**, **120**) aufrecht zu erhalten.

12. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 7, bei der wenigstens die Verteilungs- und/oder Rückführungsbus-Pumpsignale ihren jeweiligen Bus an mehr als einem Ende betreten.

13. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 7, bei der mehrere Sensoren auf die Stufen unter Verwendung von Sternkopplern (**150**, **152**) multiplexiert sind.

14. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 7, ferner umfassend eine Vielzahl von Verzögerungsleitungen, die entlang wenigstens einem der Busse (**100**, **120**) angeordnet sind, um die Auflösung und Erfassung von jedem der optischen Rückführungssignale zu ermöglichen.

15. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 7, wobei wenigstens einer der Busse (**100**, **120**) ein Faser-Bragg-Gitter an einem Ende umfasst, um jegliche nicht verwendete Energie zu reflektieren.

16. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 1, wobei die wenigstens eine optische Faser umfasst: einen Verteilungsbus (**100**) und einen Rückführungsbus (**120**), die beide eine Pumpenergie ausbreiten, wobei die Pumpenergie eine Verstärkung an optischen Verstärkern (**130**, **132**) bereitstellt, die entlang der Verteilungs- und Rückführungsbusse (**100**, **120**) positioniert sind; eine Vielzahl von Stufen, die durch eine Vielzahl von Kopplern (**140**, **142**) mit den Verteilungs- und Rückführungsbussen (**100**, **120**) verbunden sind, wobei jede der Stufen wenigstens einen der Vielzahl von Sensoren (**110**) umfasst, der einen jeweiligen Abschnitt eines optischen Eingangssignals empfängt, das in den Verteilungsbus (**100**) eingegeben wird, wobei die Sensoren (**110**) jeweilige optische Rückführungssignale erzeugen, die in den Rückführungsbus (**120**) eintreten, wobei die Anzahl der Stufen und die Anzahl der Sensoren (**110**) in jeder Stufe eine Gesamtanzahl von Sensoren ungefähr gleich zu einer gewünschten Anzahl von gesamten Sensoren bereitstellen, wobei die Anzahl von Stufen und die Anzahl von Sensoren in den Stufen gewählt ist,

um die Rauschzahl der Optischen-Sensor-Architektur zu verringern.

17. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 16, wobei die Anzahl der Stufen und die Anzahl der Sensoren in den Stufen die Rauschzahl verringern, aber nicht minimieren, um die Verteilungs- und Rückführungspumpenergieanforderungen zu verringern.

18. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 16, wobei der Teil des optischen Eingangssignals, das durch die Koppler (**140**, **142**) bei der Verteilung gekoppelt wird, die Rauschzahl der Optischen-Sensor-Architektur für bestimmte Pegel eines optischen Eingangssignals und für Verteilungs- und Rückführungspumpensignale verringert.

19. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 16, wobei die Anzahlen von Sensoren für die Stufen für jede Stufe gleich sind.

20. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 1, wobei die wenigstens eine optische Faser umfasst: einen Verteilungsbuss (**100**) und einen Rückführungsbuss (**120**), die beide eine Pumpenergie ausbreiten, wobei die Pumpenergie eine Verstärkung an optischen Verstärkern (**130**, **132**) bereitstellt, die entlang der Verteilungs- und Rückführungsbusse (**100**, **120**) positioniert sind; eine Vielzahl von Stufen, die durch die Vielzahl von Kopplern (**140**, **142**) mit den Verteilungs- und Rückführungsbussen (**100**, **120**) verbunden sind, wobei jede der Stufen wenigstens einen der Vielzahl von Sensoren (**110**) umfasst, der einen jeweiligen Abschnitt eines optischen Eingangssignals, das in den Verteilungsbuss (**100**) eingegeben wird, empfängt, wobei die Sensoren (**110**) jeweilige optische Rückführungssignale erzeugen, die in den Rückführungsbuss (**120**) eintreten, wobei die jeweiligen Teile des optischen Eingangssignals, die in die Stufen von den Kopplern (**140**) in dem Verteilungsbuss (**100**) eingekoppelt werden, und die jeweiligen Teile der optischen Rückführungssignale, die in den Rückführungsbuss (**120**) von den Kopplern (**142**) in dem Rückführungsbuss (**120**) gekoppelt werden, gewählt sind, um die Rauschzahl der Optischen-Sensor-Architektur für eine Gesamtanzahl der Sensoren ungefähr gleich zu einer gewünschten Anzahl von gesamten Sensoren zu verringern.

21. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 20, wobei die Anzahl der Stufen und die Anzahl von Sensoren in jeder Stufe gewählt sind, um die Rauschzahl der Optischen-Sensor-Architektur zu verringern.

22. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 21, wobei die Anzahlen von Sensoren in den Stufen gleich sind.

23. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 21, wobei die Anzahl der Stufen, die Anzahl der Sensoren in den Stufen, und die Kopplungsteile die Rauschzahl verringern, aber nicht minimieren, so dass die Verteilungs- und Rückführungspumpenergieanforderungen ebenfalls verringert werden.

24. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 21, wobei die Verteilungskopplungsteile gleich sind.

25. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 21, wobei die Rückführungsbuss-Kopplungsteile für die Stufen gleich sind.

26. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 20, ferner umfassend wenigstens ein Faser-Bragg-Gitter, das an einem Ende von wenigstens einem der Busse (**100**, **120**) positioniert ist, um jegliche nicht verwendete Energie in dem wenigstens einen der Busse (**100**, **120**) zu reflektieren.

27. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 20, wobei der wenigstens eine Sensor in jeder Stufe eine optische Sensorgruppe umfasst, die wenigstens zwei Sensoren umfasst, und wobei ein Kopplungsverhältnis zwischen einem ersten Ende jeder Sensorgruppe und dem Verteilungsbuss (**100**) zwischen ungefähr 0,4 und 0,95 ist.

28. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 20, wobei der wenigstens eine Sensor (**110**) in jeder Stufe eine optische Sensorgruppe umfasst, wobei jede Sensorgruppe eine Vielzahl von Sensoren umfasst, die zwischen den Verteilungsbuss (**100**) und den Rückführungsbuss (**120**) gekoppelt sind, und wobei eine Anzahl von Sensoren in jeder Sensorgruppe gewählt ist, um ein maximales Signal-zu-Rauschverhältnis für das gestörte optische Signal bereit zu stellen.

29. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 1, wobei der wenigstens eine Sensor (**110**) eine optische

Sensorgruppe umfasst, die wenigstens zwei optische Sensoren umfasst.

30. Optische-Sensor-Architektur nach Anspruch 1, wobei der wenigstens eine Sensor (110) eine optische Sensorgruppe umfasst, die wenigstens vier optische Sensoren umfasst.

31. Verfahren zum Optimieren eines Felds von optischen Sensoren, umfassend:
Koppeln eines Felds von optischen Sensoren (110) mit einer optischen Faser (100, 120) durch eine Vielzahl von Kopplern (140, 142);
Verstärken eines optischen Signals, welches sich in einer optischen Faser (100, 120) ausbreitet, durch eine Vielzahl von Verstärkern (130, 132), um Verluste in dem Feld zu kompensieren; und
Wählen von Kopplungsverhältnissen für die Koppler (140, 142) und Verstärkungen für die Verstärker (130, 132), um die Systemrauschzahl zu optimieren, wobei die Systemrauschzahl das Verhältnis eines Signal-zu-Rauschverhältnisses des optischen Eingangssignals zu einem Signal-zu-Rauschverhältnis eines optischen Signals in einem Sensor (110), der ein geringstes Signal-zu-Rauschverhältnis aufweist, ist.

32. Verfahren nach Anspruch 31, ferner umfassend die folgenden Schritte:
Ausbreiten einer Pumpenergie durch Verteilungs- und Rückführungsbusse (100, 120), wobei die Pumpenergie eine Verstärkung an optischen Verstärkern (130, 132) bereitstellt, die entlang der Verteilungs- und Rückführungsbusse (100, 120) positioniert sind;
Verbinden einer Vielzahl von Stufen mit den Verteilungs- und Rückführungsbusen (100, 120) über eine Vielzahl von Kopplern (140, 142), wobei jede der Stufen wenigstens einen Sensor (110) umfasst, der einen jeweiligen Abschnitt eines optischen Eingangssignals, das in den Verteilungsbus (100) eingegeben wird, empfängt, wobei die Sensoren jeweilige optische Rückführungssignale erzeugen, die in den Rückführungsbus (120) eintreten; und
Wählen der Anzahl der Stufen und der Anzahl von Sensoren in jeder Stufe, um eine Gesamtanzahl der Sensoren ungefähr gleich zu einer gewünschten Anzahl von gesamten Sensoren bereit zu stellen, wobei die Anzahl von Stufen und die Anzahl von Sensoren in den Stufen gewählt sind, um die Rauschzahl der Optischen-Sensor-Architektur zu verringern.

33. Verfahren nach Anspruch 32, wobei die Anzahl der Stufen und die Anzahlen der Sensoren in den Stufen gewählt sind, um die Rauschzahl zu verringern, aber nicht zu minimieren, so dass die Verteilungs- und Rückführungspumpenergieanforderungen ebenfalls verringert werden.

34. Verfahren nach Anspruch 32, wobei der Teil des optischen Eingangssignals, dass durch die Koppler (140) in dem Verteilungsbus (100) in die Stufen gekoppelt wird, gewählt wird, um die Rauschzahl der Optischen-Sensor-Architektur für bestimmte Pegel eines optischen Eingangssignals und von Verteilungs- und Rückführungspumpensignalen zu verringern.

35. Verfahren nach Anspruch 32, wobei die Anzahl von Sensoren in den Stufen für jede Stufe gleich sind.

36. Verfahren nach Anspruch 32, ferner umfassend die folgenden Schritte: Wählen von jeweiligen Teilen des optischen Eingangssignals, das in die Stufen durch die Koppler (140) in dem Verteilungsbus (100) eingekoppelt sind, und von jeweiligen Teilen der optischen Rückführungssignale, die in den Rückführungsbus (120) von den Kopplern (142) in dem Rückführungsbus (120) gekoppelt werden, um die Rauschzahl der Optischen-Sensor-Architektur für eine Gesamtanzahl der Sensoren ungefähr gleich zu einer gewünschten Anzahl von gesamten Sensoren zu verringern.

37. Verfahren nach Anspruch 36, wobei die Anzahl der Stufen und die Anzahl der Sensoren in jeder Stufe gewählt sind, um die Rauschzahl der Optischen-Sensor-Architektur zu verringern.

38. Verfahren nach Anspruch 37, wobei die Anzahl von Sensoren in den Stufen gleich sind.

39. Verfahren nach Anspruch 36, wobei die Anzahl der Stufen, die Anzahlen der Sensoren in den Stufen, und die Kopplungsteile gewählt sind, um die Rauschzahlen zu verringern, aber nicht zu minimieren, so dass die Verteilungs- und Rückführungspumpenergieanforderungen ebenfalls verringert werden.

40. Verfahren nach Anspruch 36, wobei die Verteilungsbus-Kopplungsteile für die Stufen alle im wesentlichen gleich sind.

41. Verfahren nach Anspruch 36, wobei die Rückführungsbus-Kopplungsteile alle im wesentlichen gleich

sind.

42. Verfahren nach Anspruch 36, wobei der Wählschritt den Schritt zum Wählen eines gewünschten Pegels eines optischen Eingangssignals und von gewünschten Pegeln des Verteilungspumpsignals und der Rückführungspumpsignale einschließt.

43. Verfahren nach Anspruch 42, wobei die Vielzahl von Sensoren (**110**) als ein Feld von Unterfeldern angeordnet sind, die zwischen den Verteilungsbus (**100**) und den Rückführungsbus (**120**) an jeder der mehreren Stufen angeordnet sind, und wobei das Verfahren ferner den Schritt zum Wählen einer optimalen Anzahl von Sensoren für jedes Unterfeld einschließt.

44. Verfahren nach Anspruch 42, wobei das Signal-zu-Rauschverhältnis durch Optimieren eines Kopplungsverhältnisses zwischen jedem besagten Sensor (**110**) und dem Verteilungsbus (**100**) verbessert wird.

45. Verfahren nach Anspruch 44, wobei das Signal-zu-Rauschverhältnis durch Optimieren eines Kopplungsverhältnisses zwischen jedem Sensor (**110**) und dem Rückführungsbus (**120**) verbessert wird.

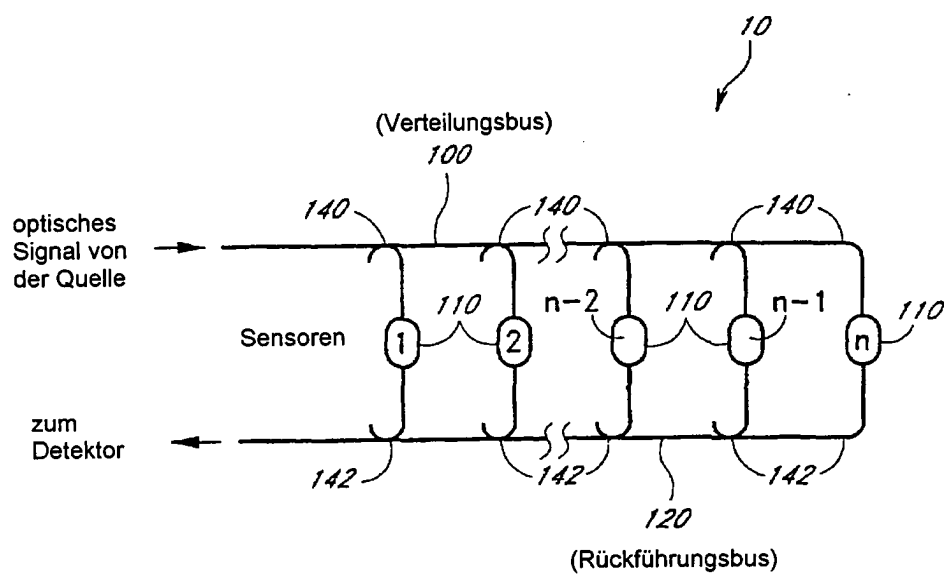
46. Verfahren nach Anspruch 42, wobei das Signal-zu-Rauschverhältnis durch Optimieren eines Kopplungsverhältnisses zwischen jedem Sensor (**110**) und dem Rückführungsbus (**120**) verbessert wird.

47. Verfahren nach Anspruch 31, umfassend das Positionieren des Felds von optischen Sensoren zwischen einer Verteilungsfaser, die ein optisches Eingangssignal von einer Quelle (**106**) ausbreitet, und einer Rückführungsfaser (**120**), die gestörte optische Signale an einen Detektor (**126**) zurückführt, wobei jeder optische Sensor mit der Verteilungsfaser über einen jeweiligen Eingangskoppler gekoppelt ist und mit der Rückführungsfaser durch einen entsprechenden Ausgangskoppler gekoppelt ist.

48. Verfahren nach Anspruch 47, wobei das Feld eine Vielzahl von Unterfeldern umfasst, die zwischen die Verteilungsfaser (**100**) und die Rückführungsfaser (**120**) gekoppelt sind, und wobei das Verfahren ferner den Schritt zum Auswählen einer optimalen Anzahl von Sensoren für jedes Unterfeld umfasst.

Es folgen 33 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



(passive Sensorgruppe)

Fig. 1

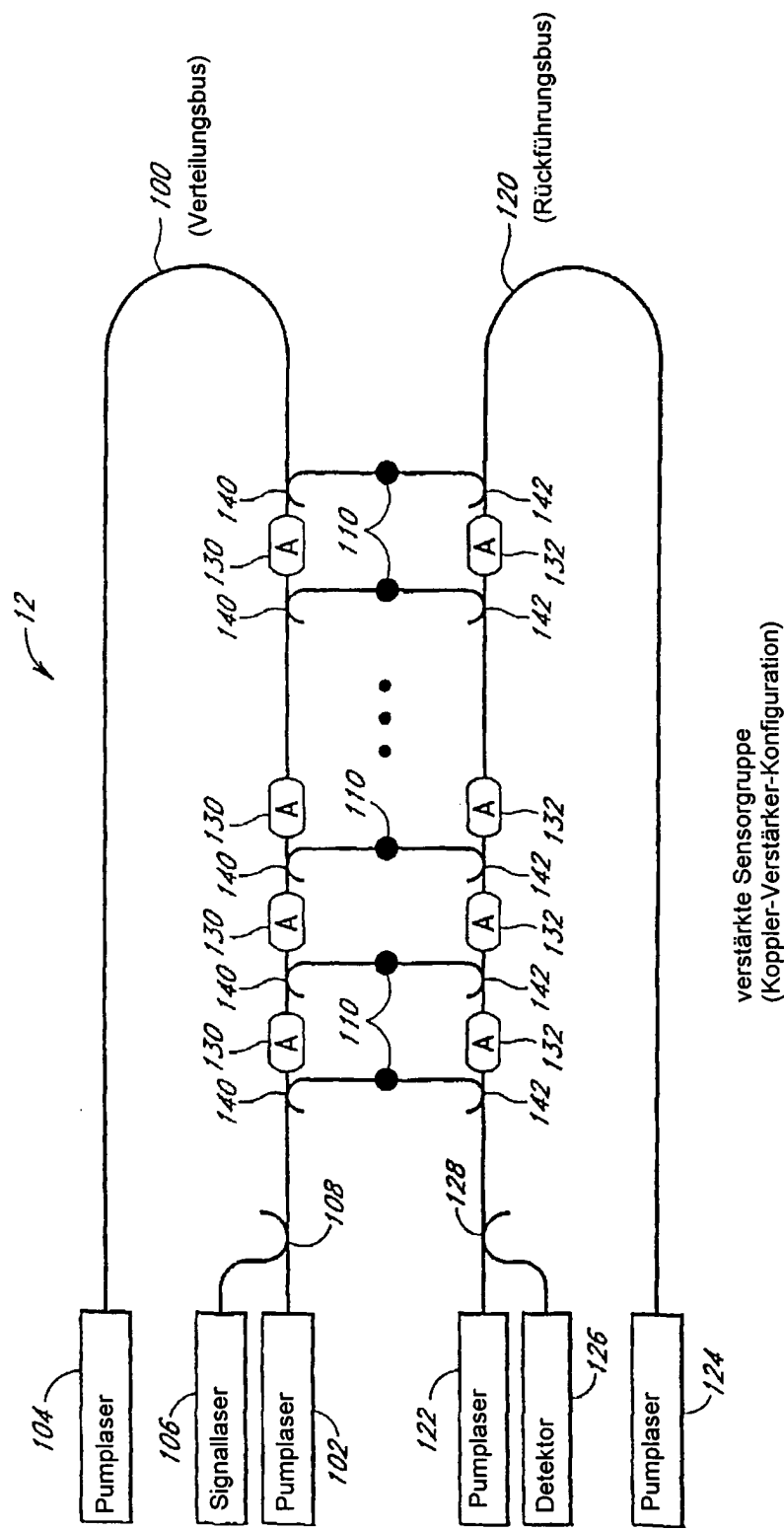


Fig. 2

verstärkte Sensorgruppe
(Koppler-Verstärker-Konfiguration)

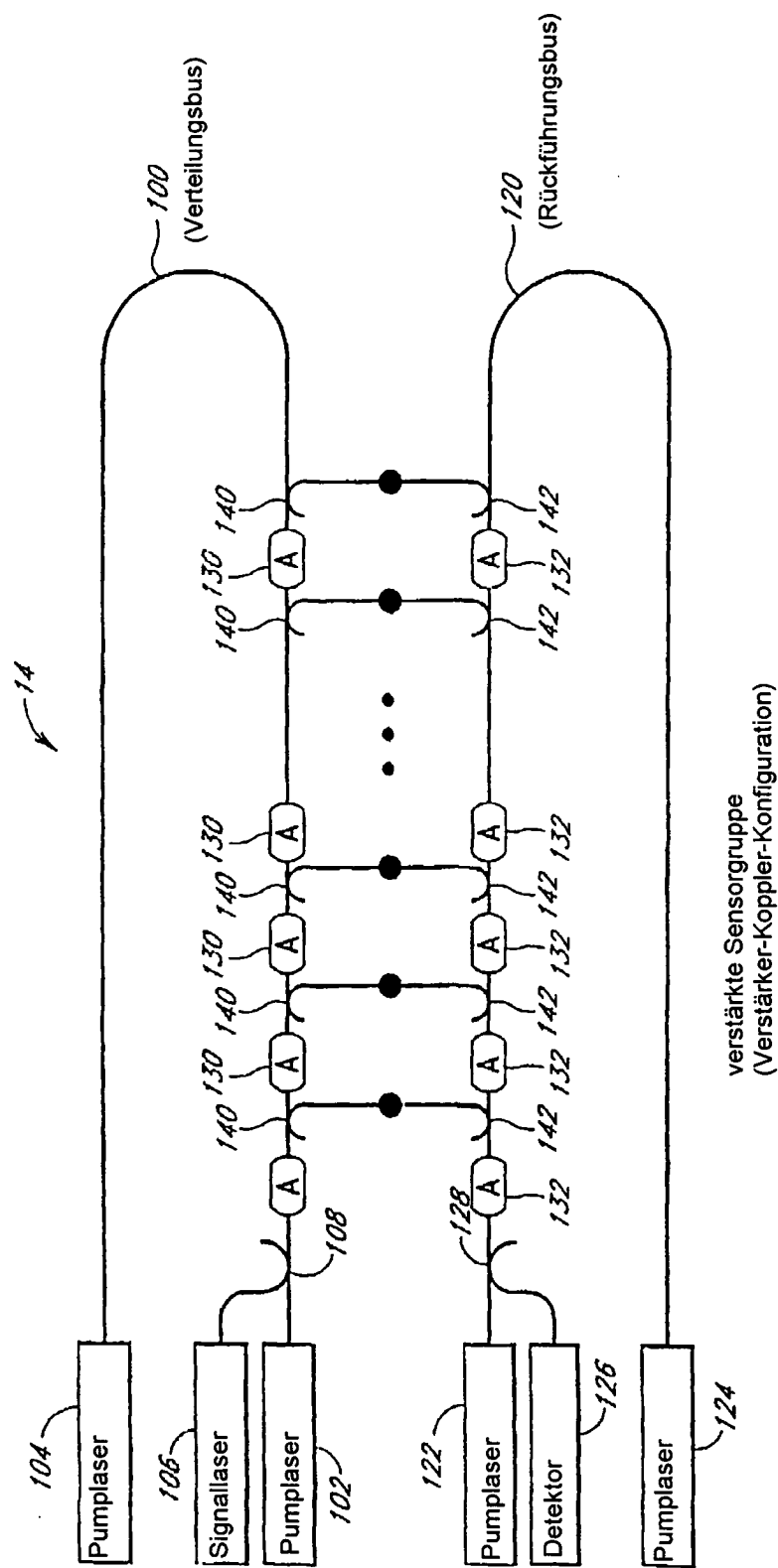


Fig. 3

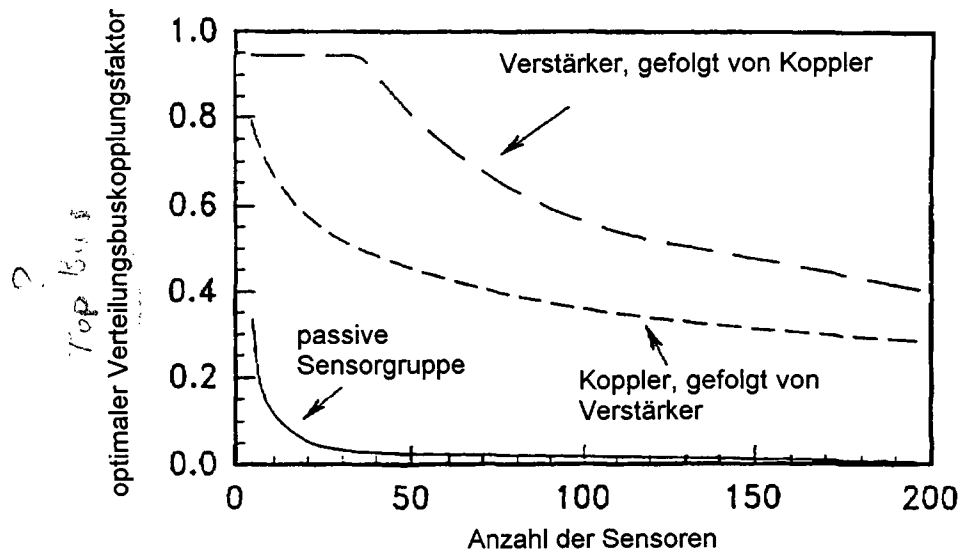


Fig. 4a

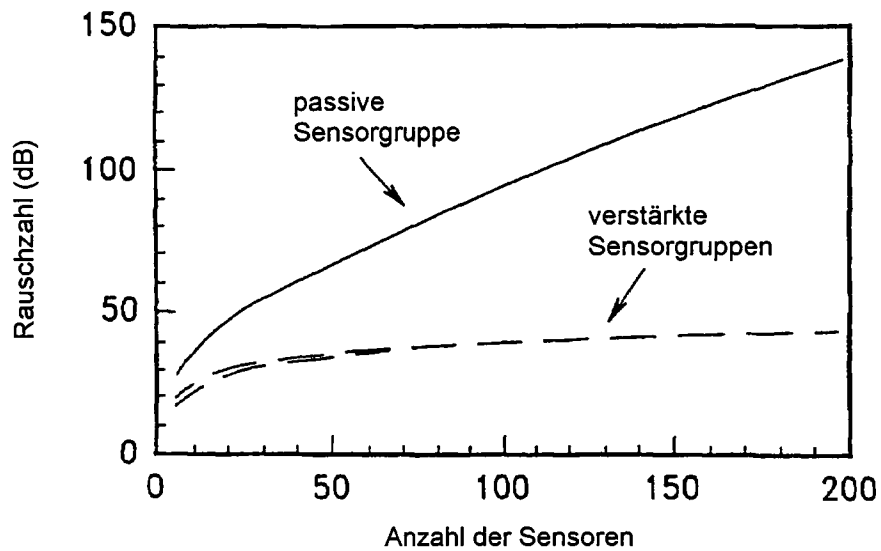


Fig. 4b

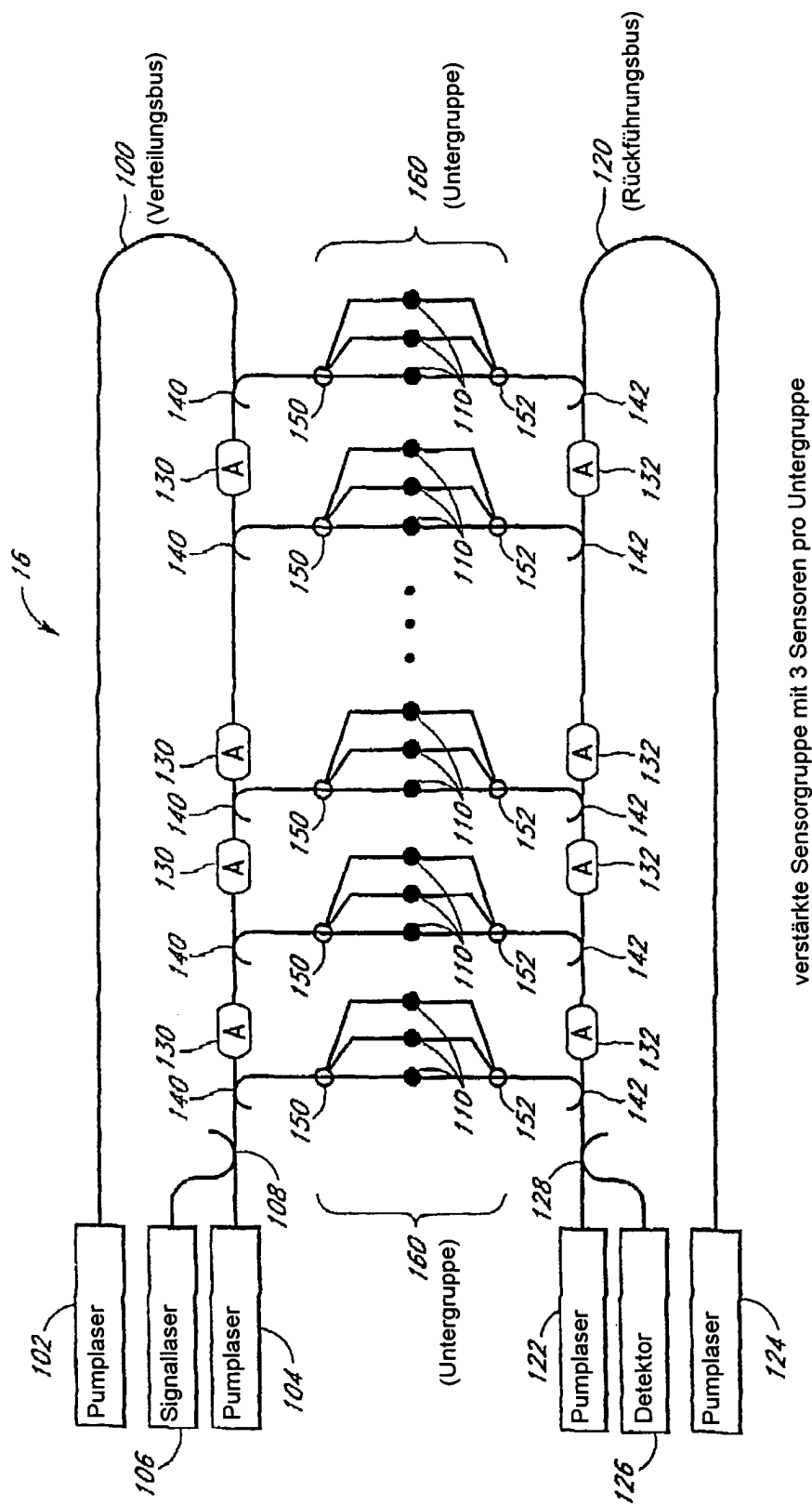
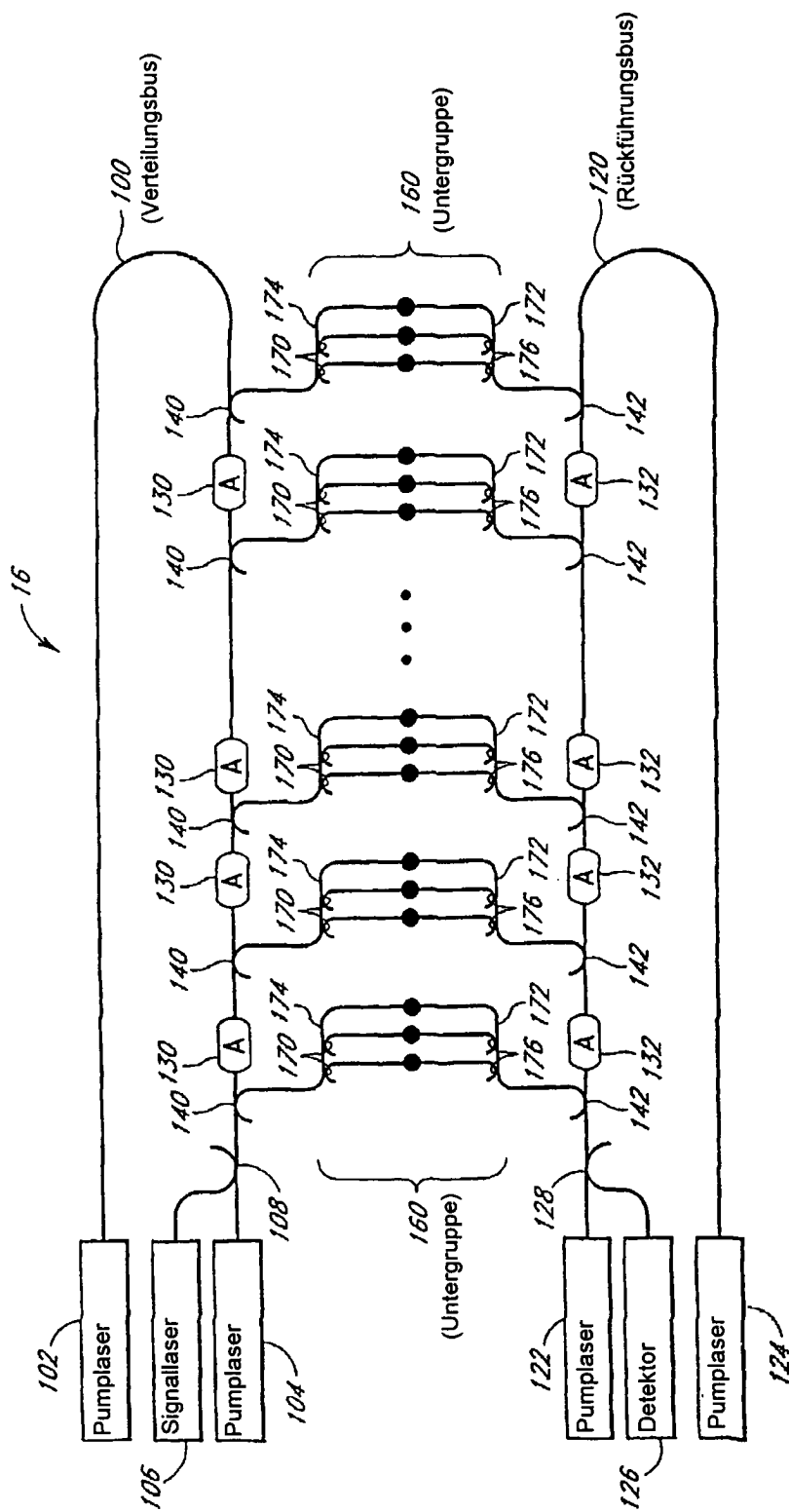


Fig. 5a

verstärkte Sensorgruppe mit 3 Sensoren pro Untergruppe



verstärkte Sensorgruppe mit 3 Sensoren pro Untergruppe

Fig. 5b

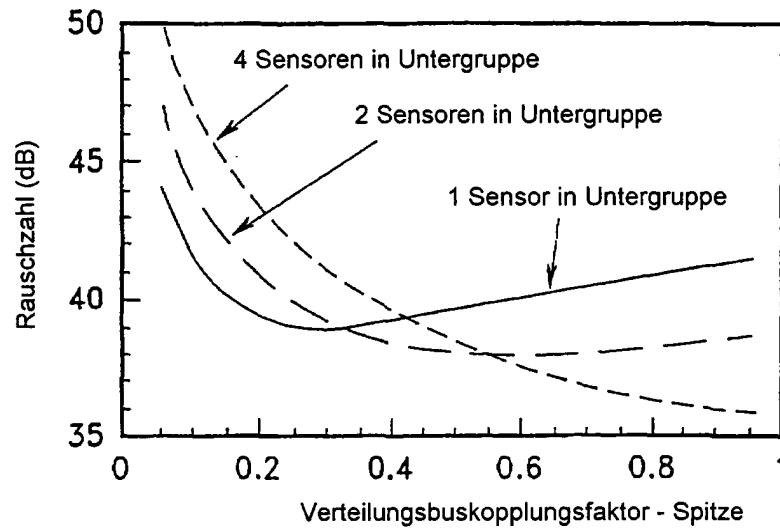


Fig. 6a

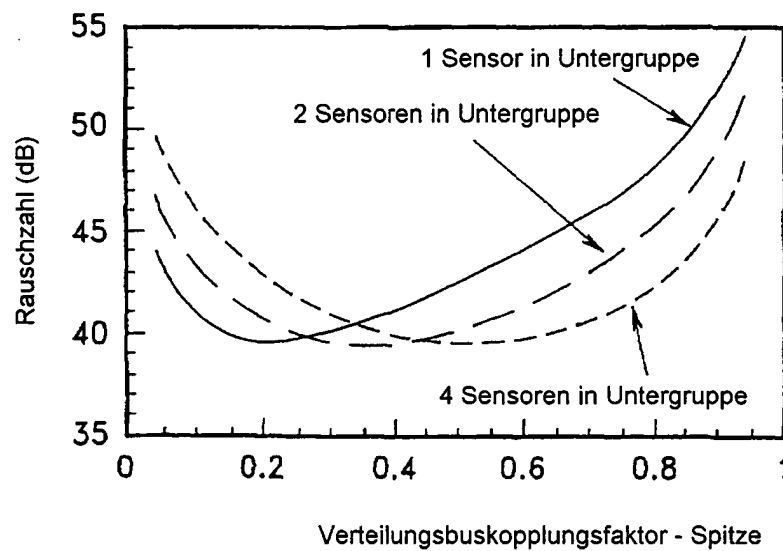
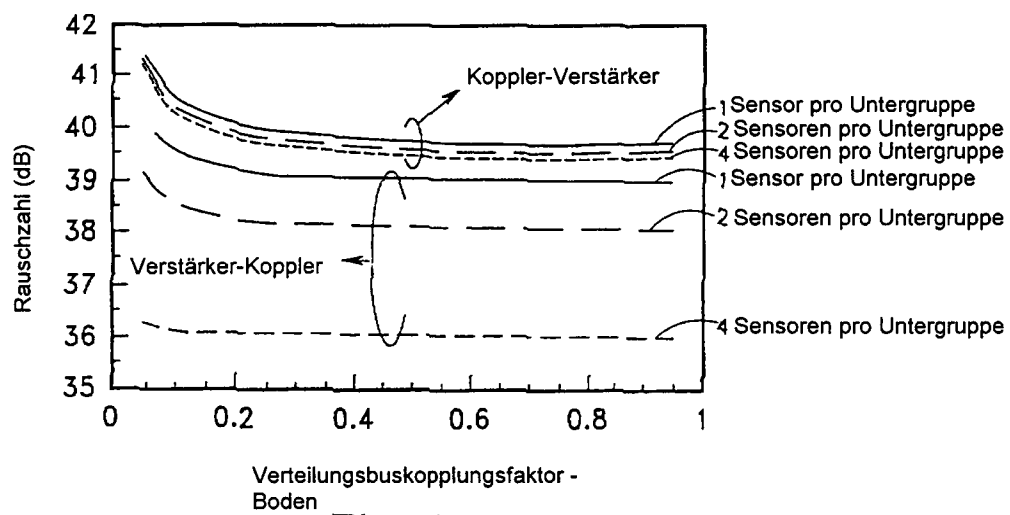
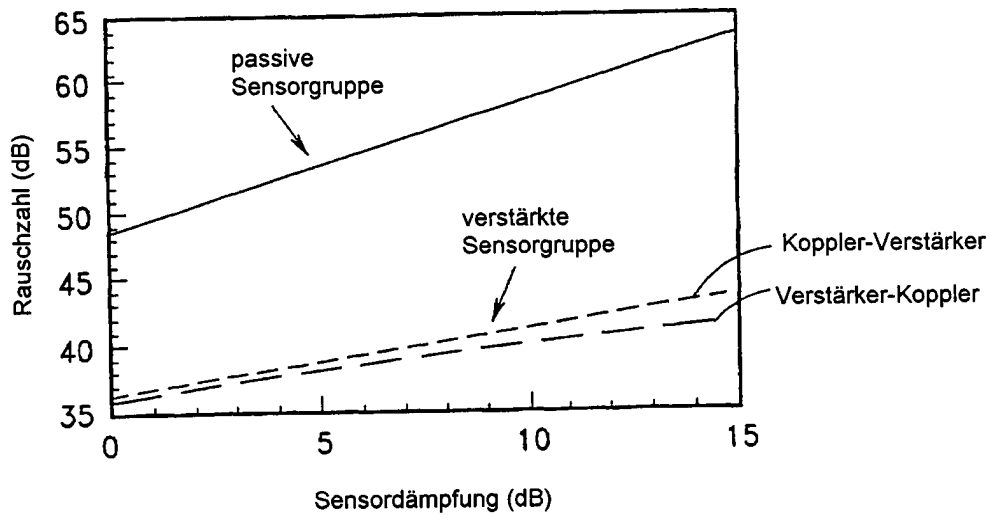
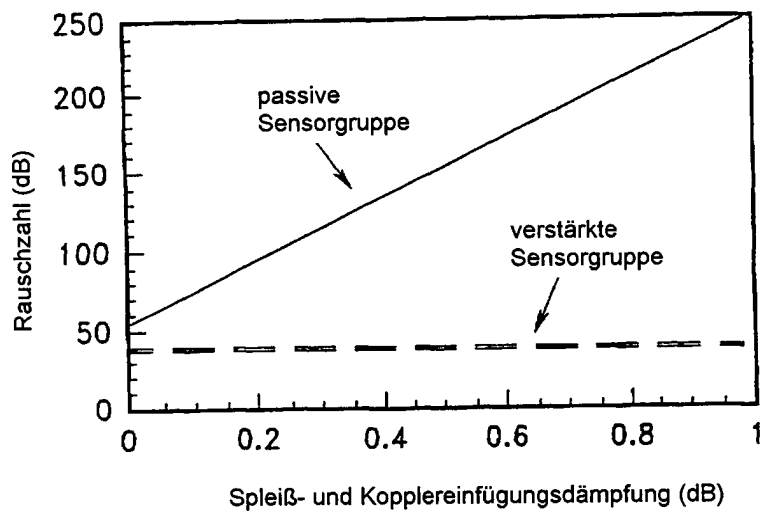
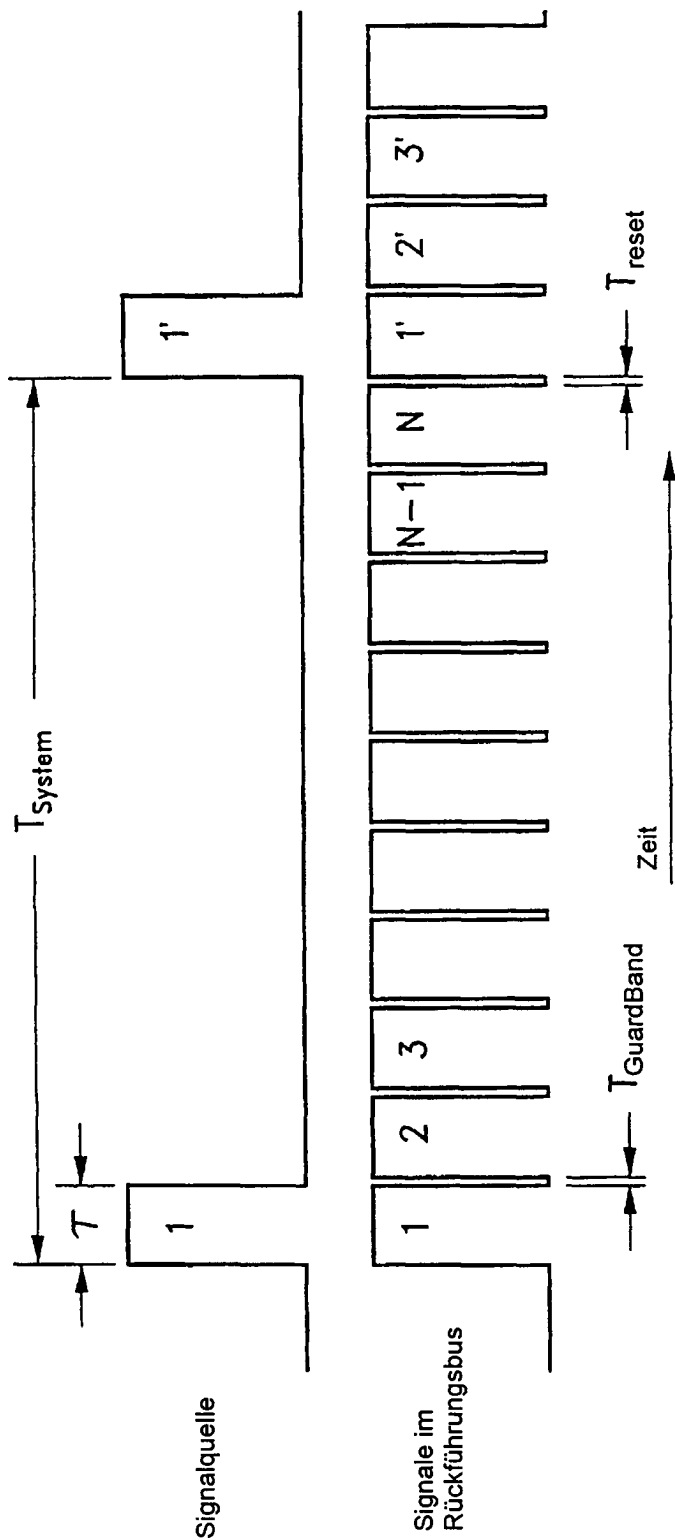


Fig. 6b

*Fig. 6c*

*Fig. 7a**Fig. 7b*



Zeitdiagramm

Fig.8

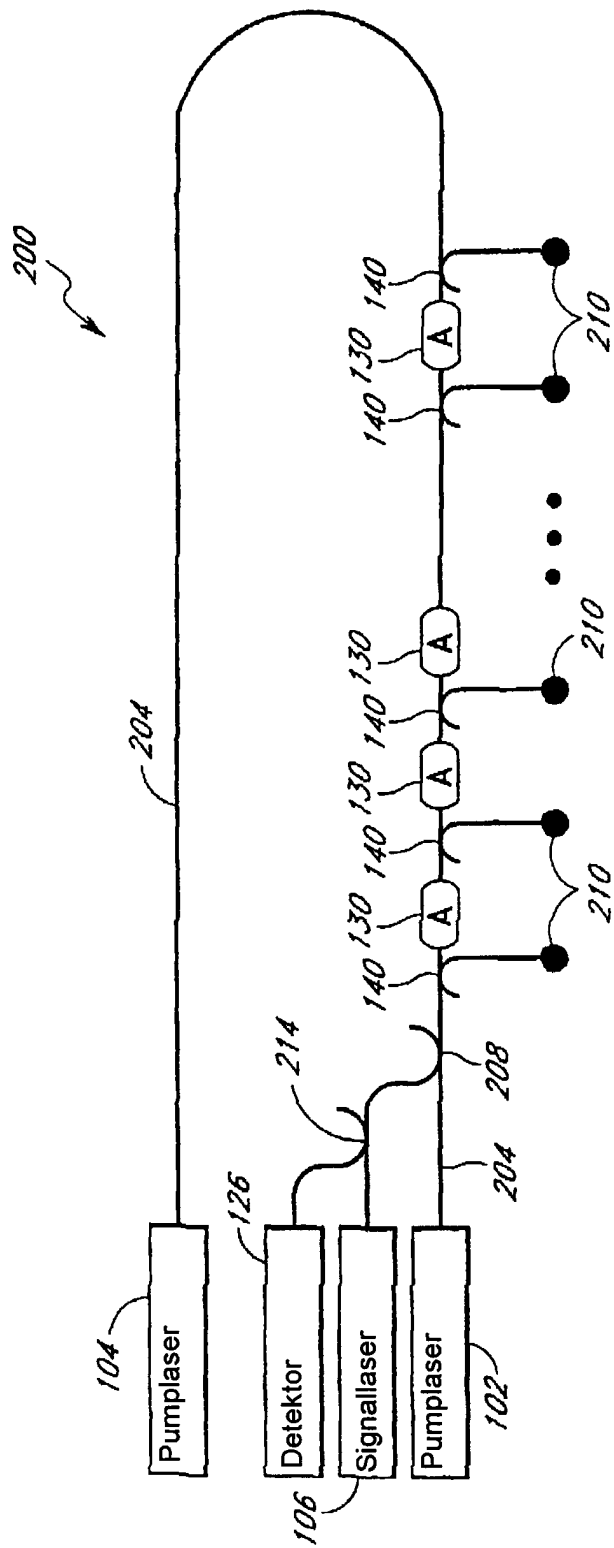


Fig. 9

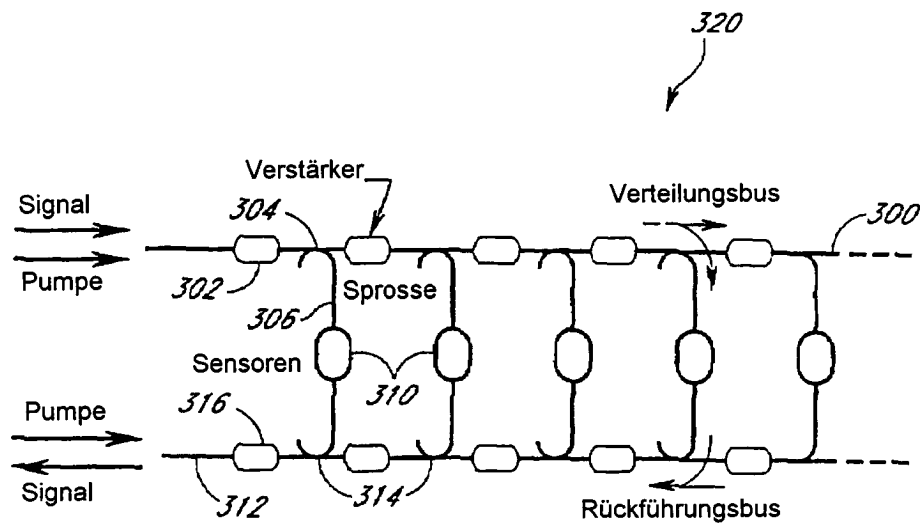


Fig. 10

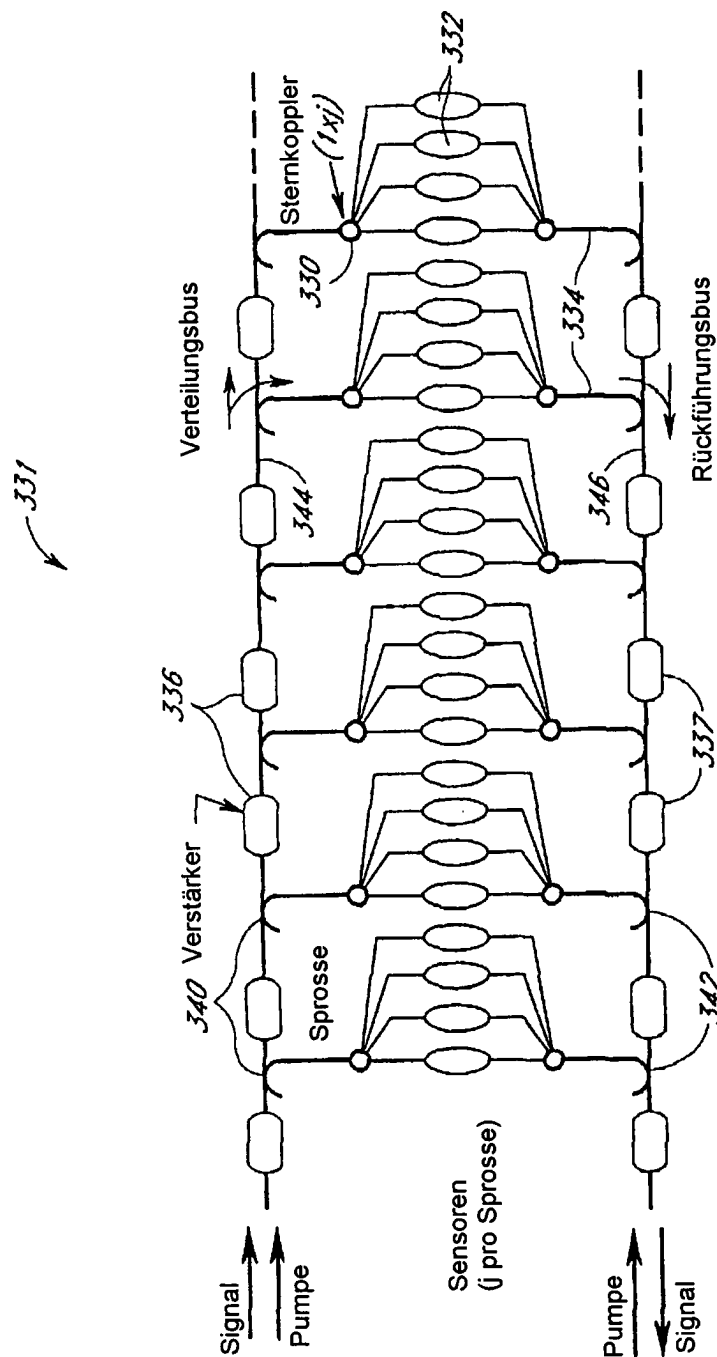


Fig. 11

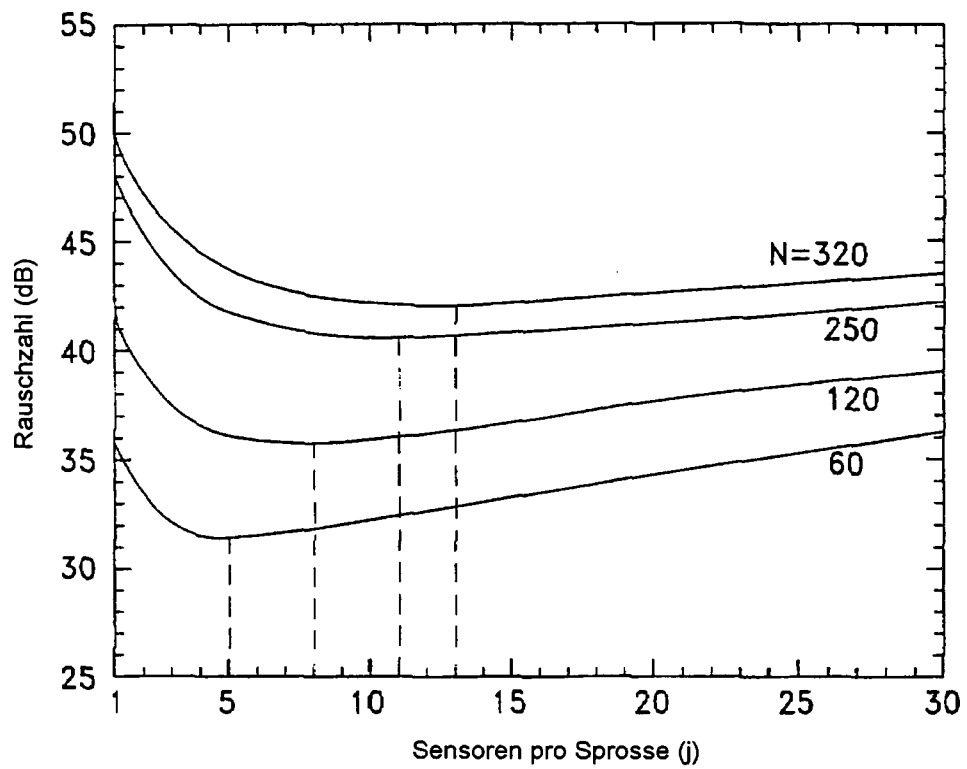
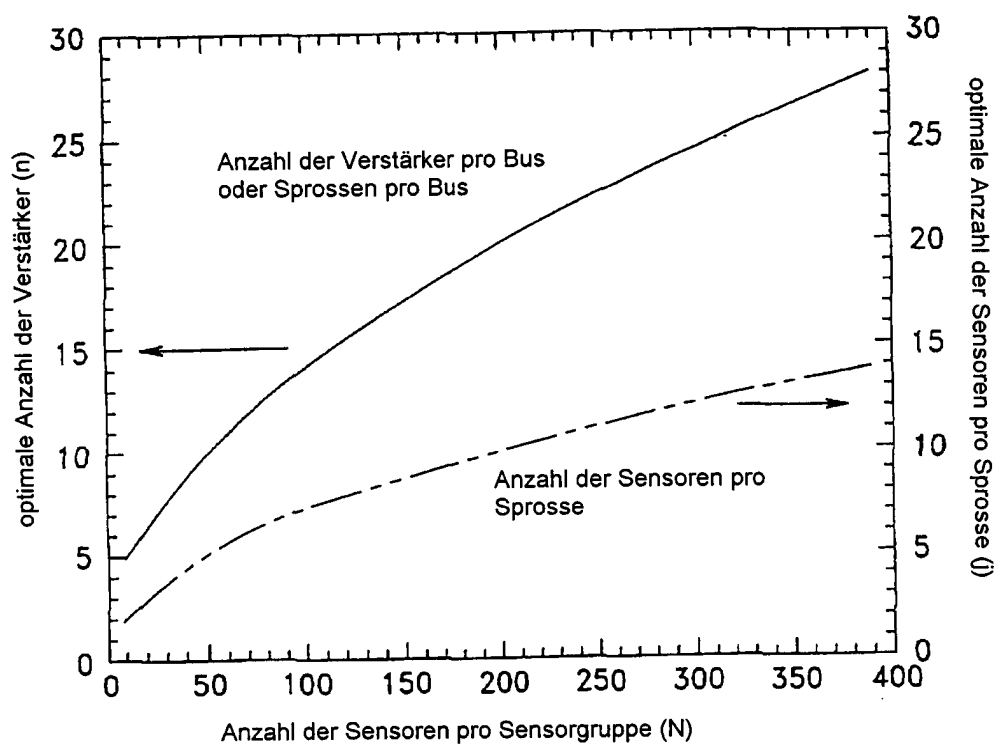
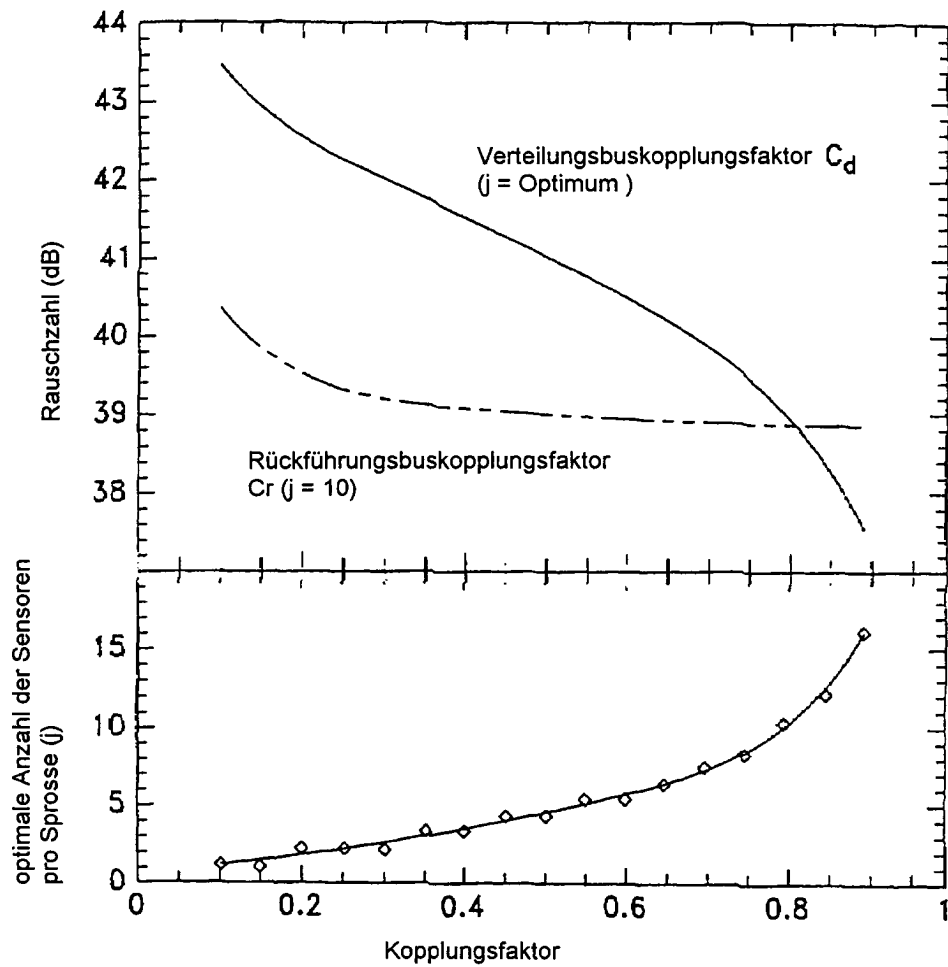
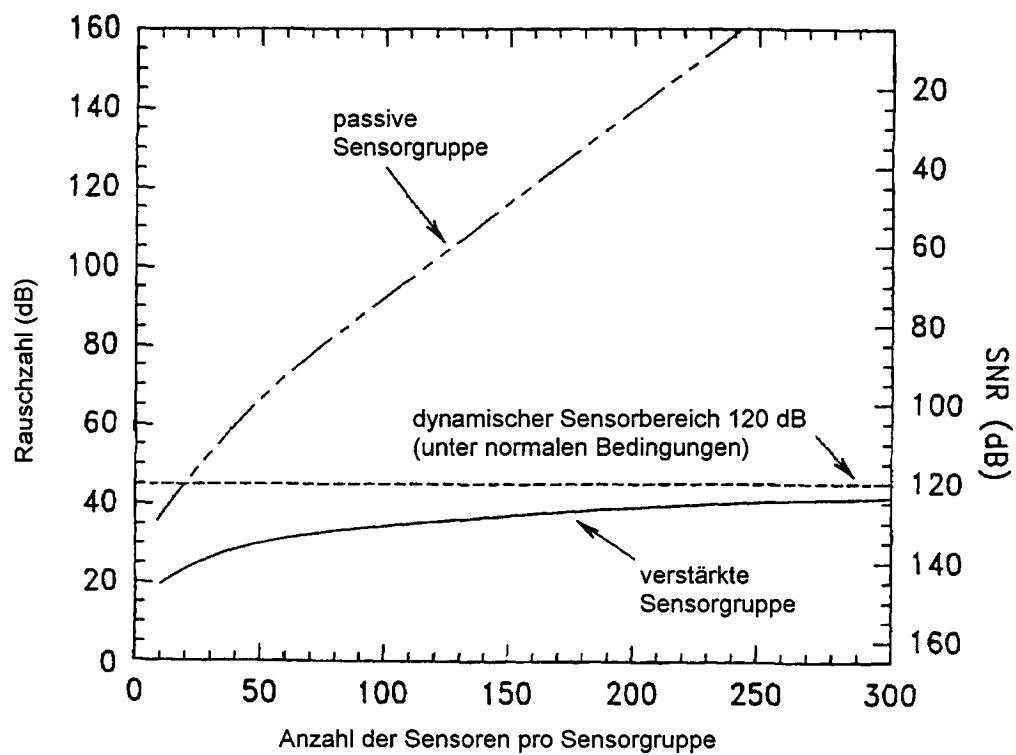


Fig. 12

*Fig. 13*

*Fig. 14*

*Fig. 15*

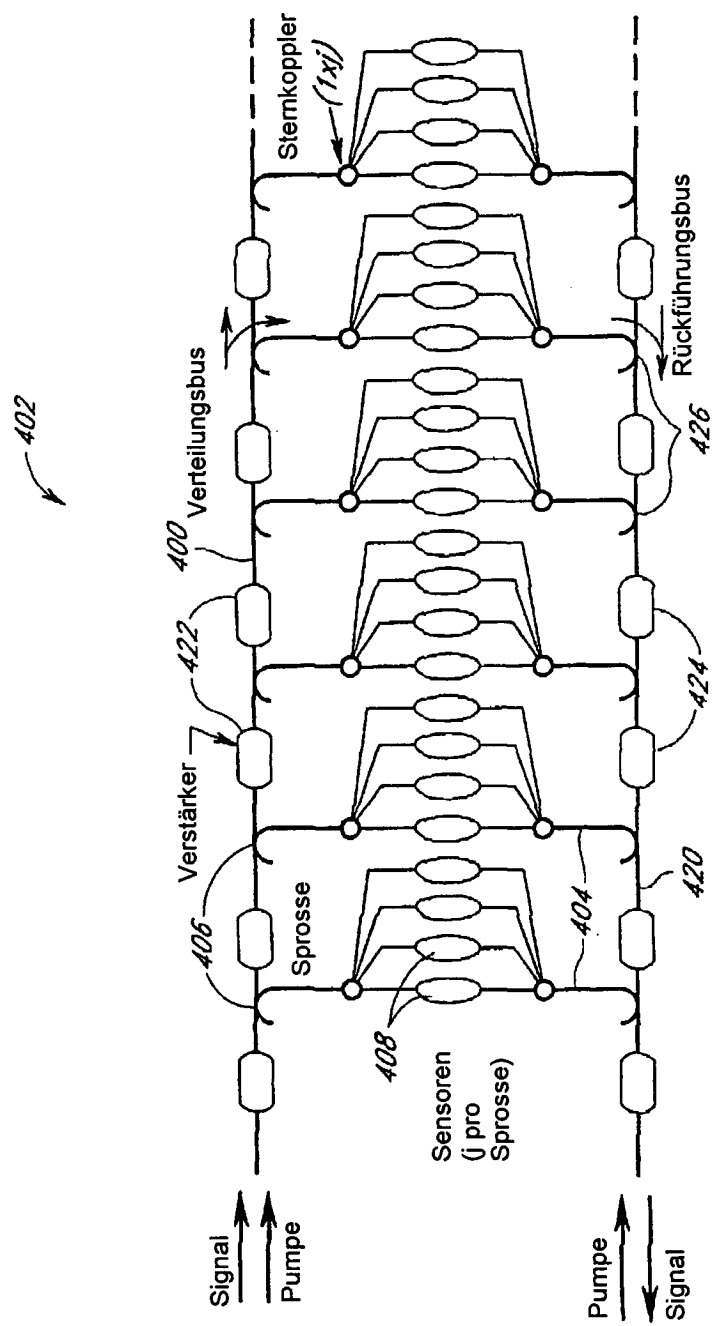


Fig. 16

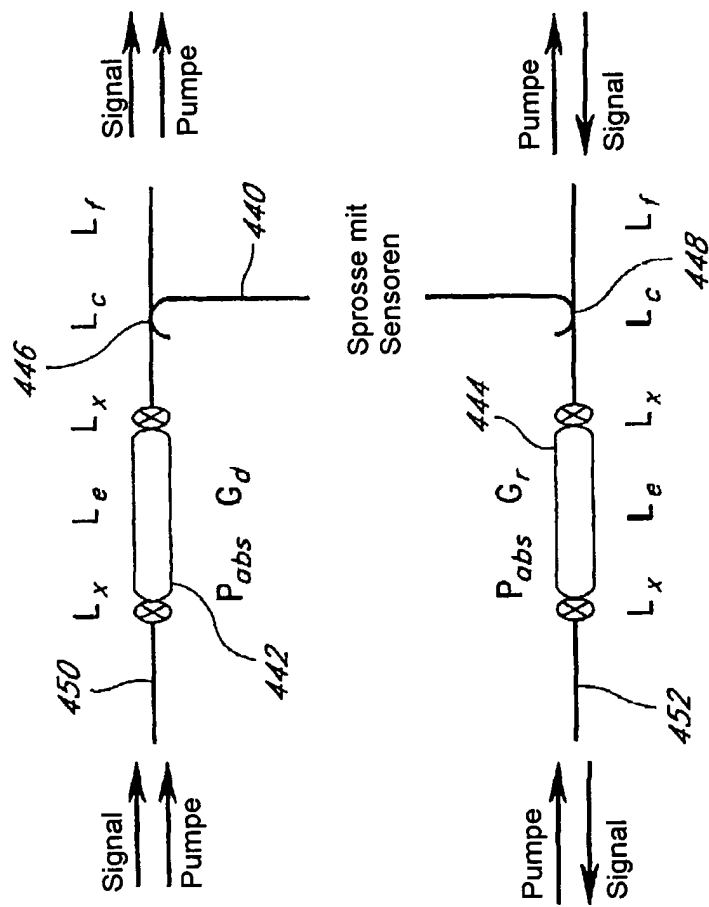
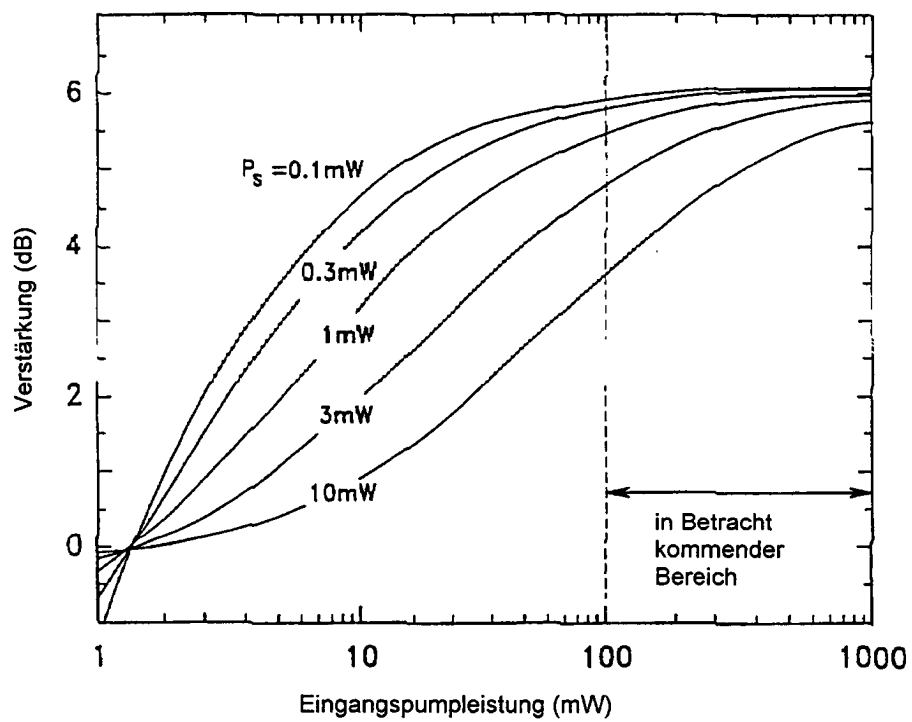
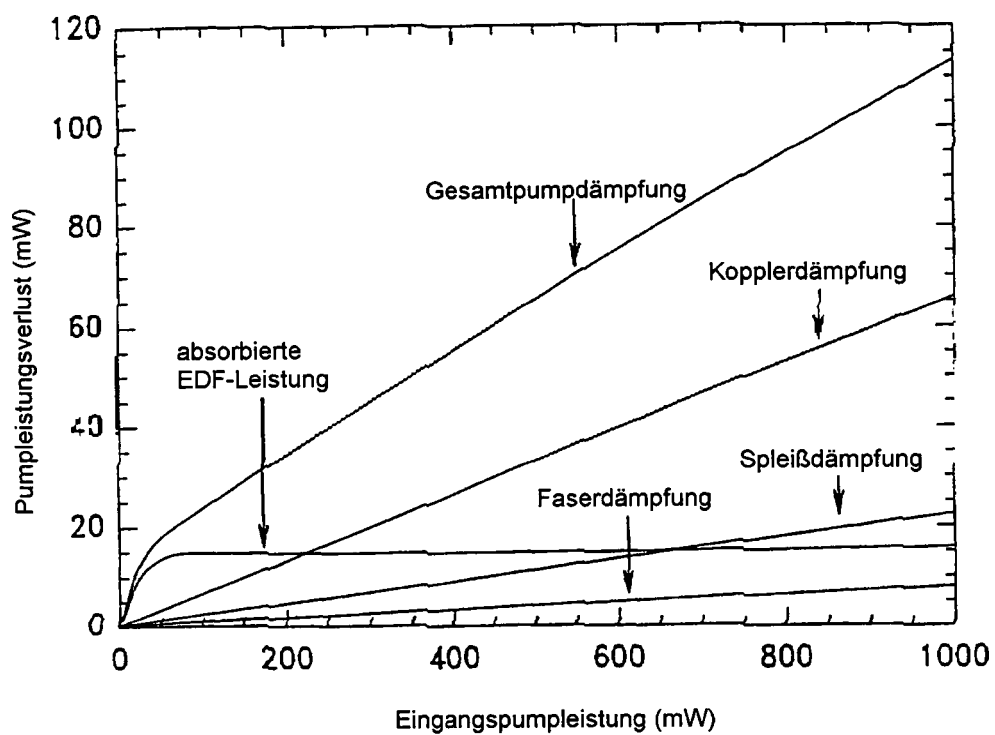
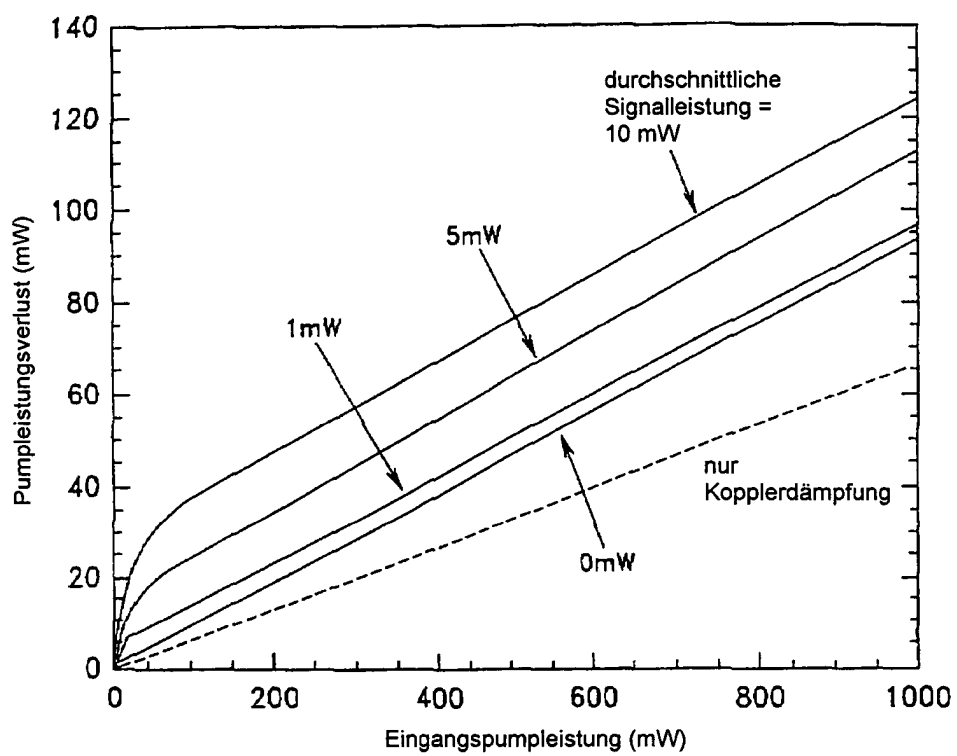
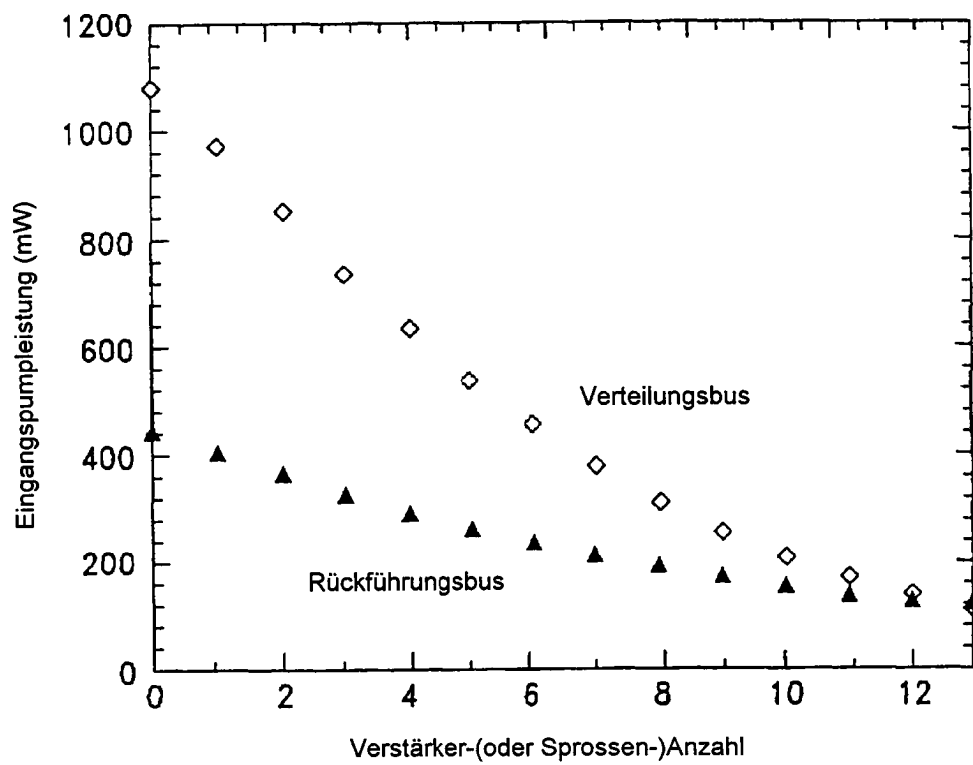


Fig. 17

*Fig. 18*

*Fig. 19*

*Fig.20*

*Fig.21*

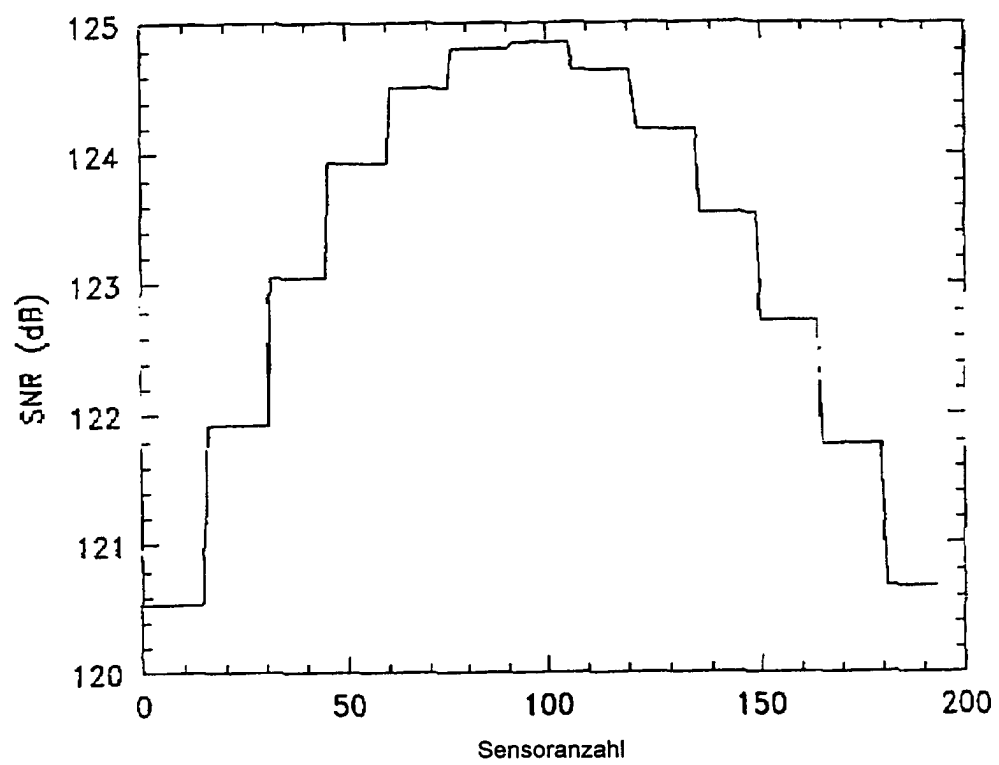


Fig.22

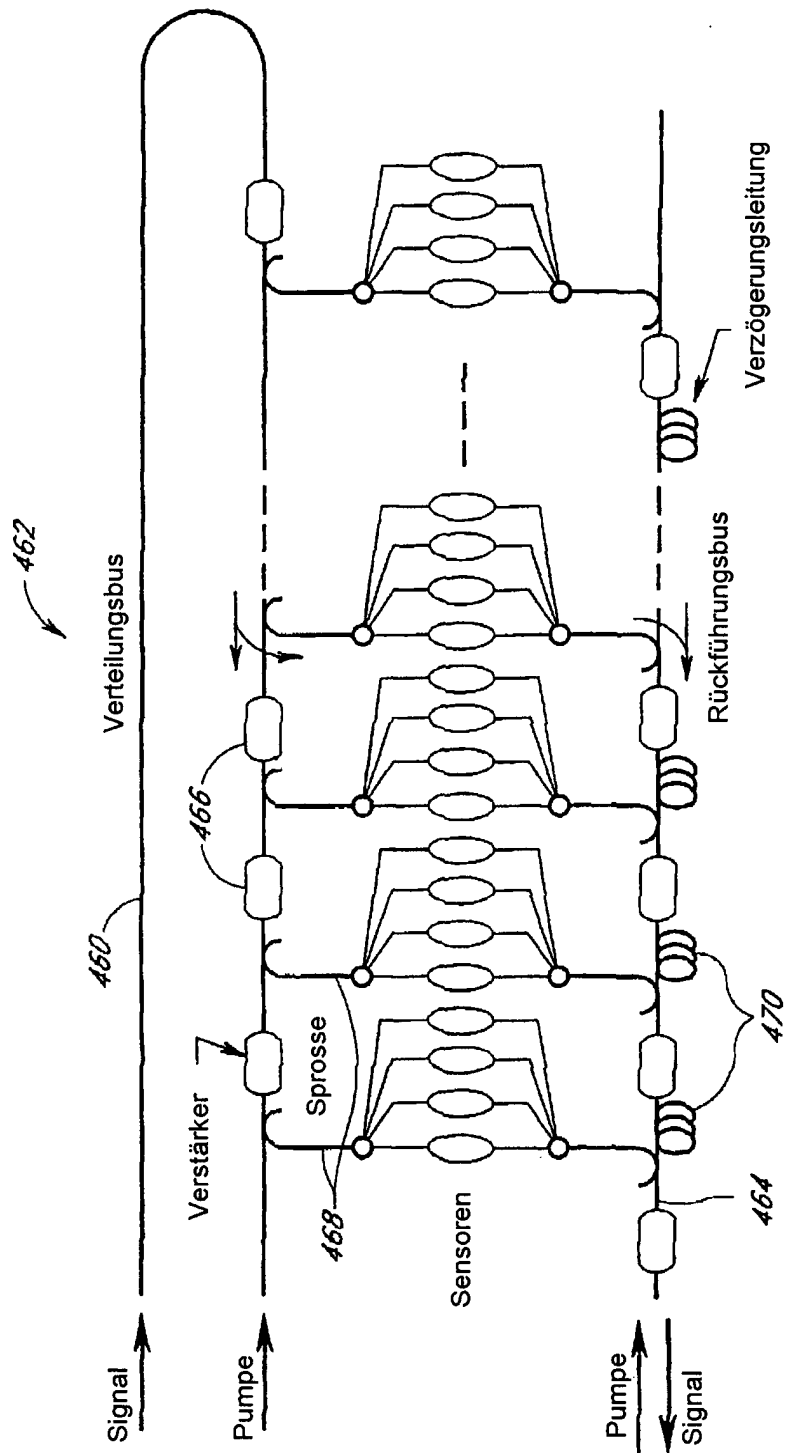


Fig. 23a

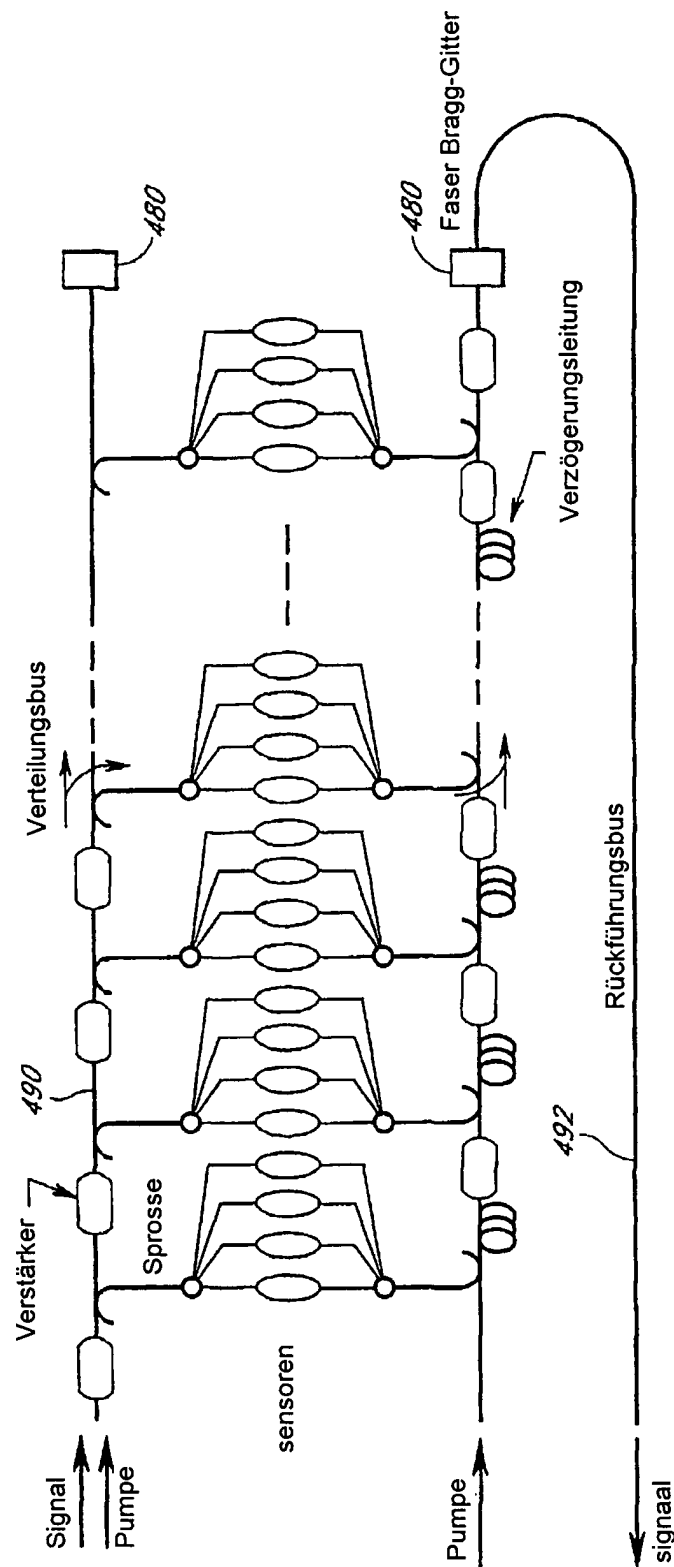


Fig. 23b

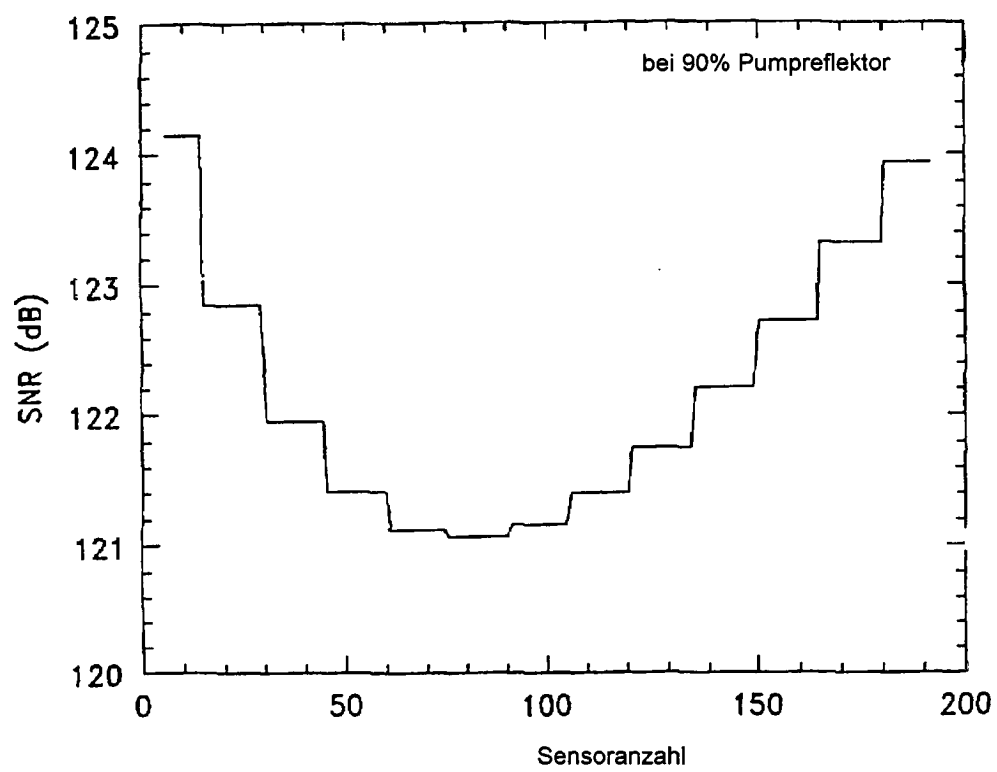


Fig.24

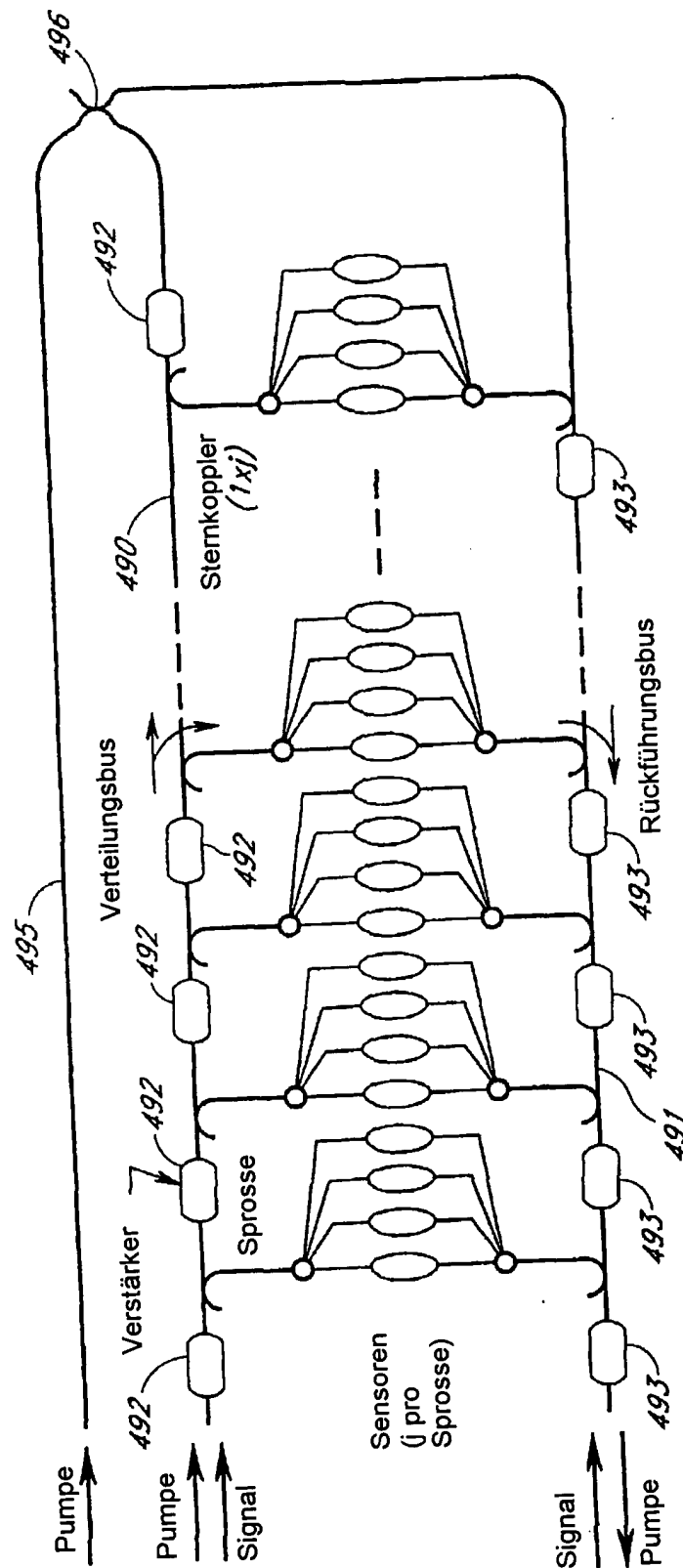
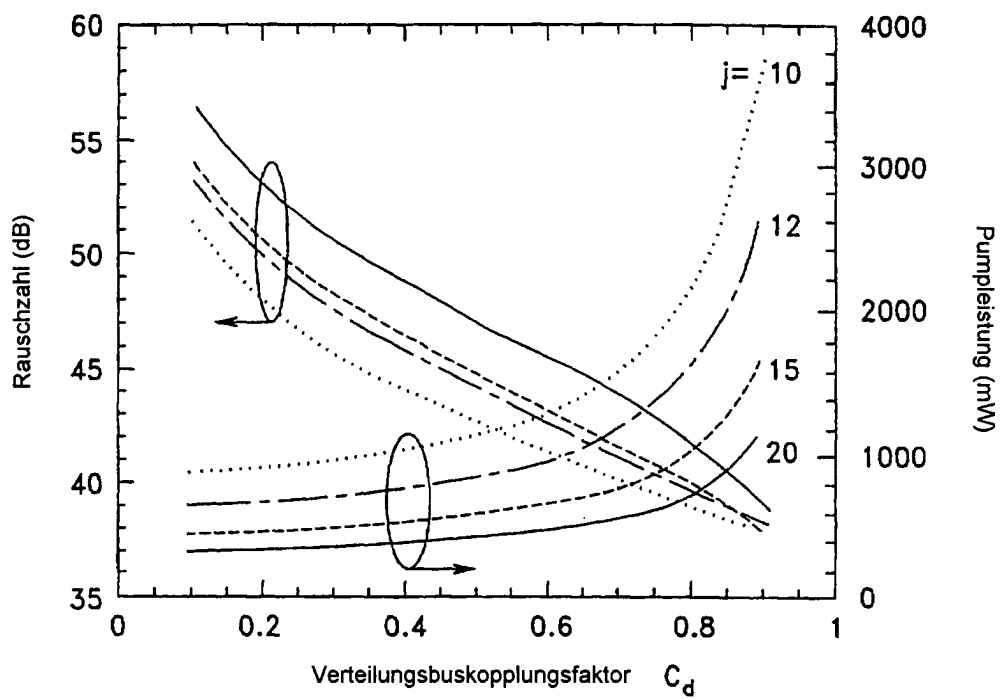
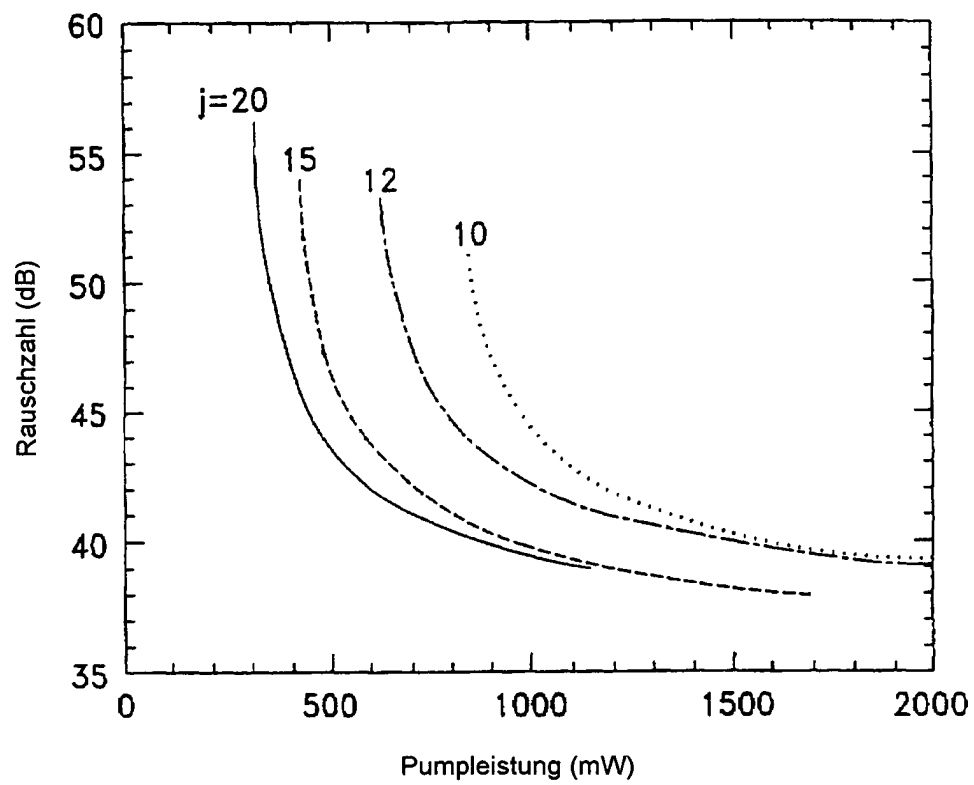
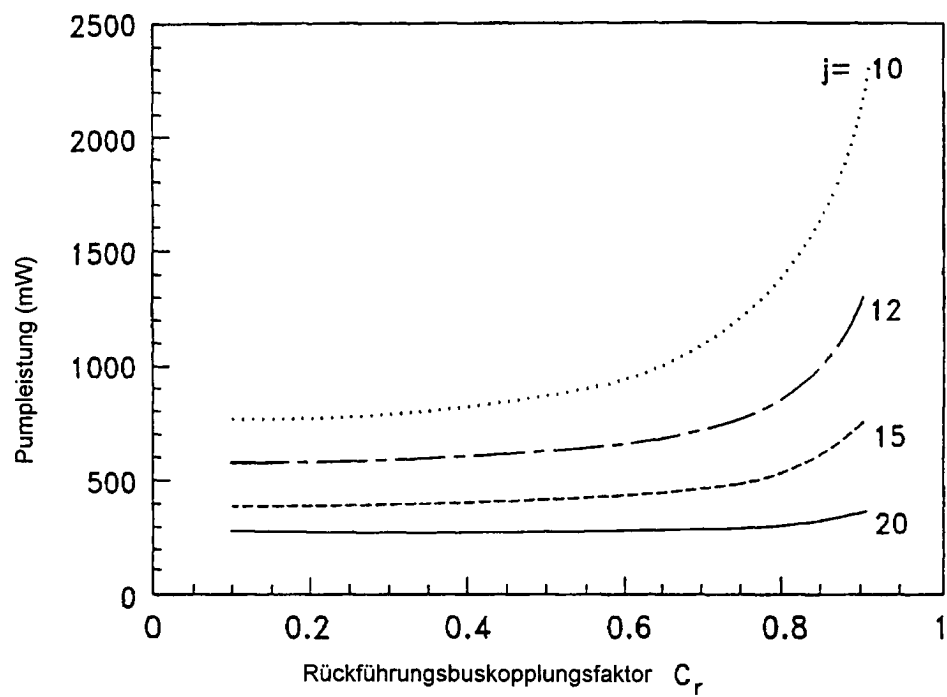


Fig. 25

*Fig.26*

*Fig.27*

*Fig.28*

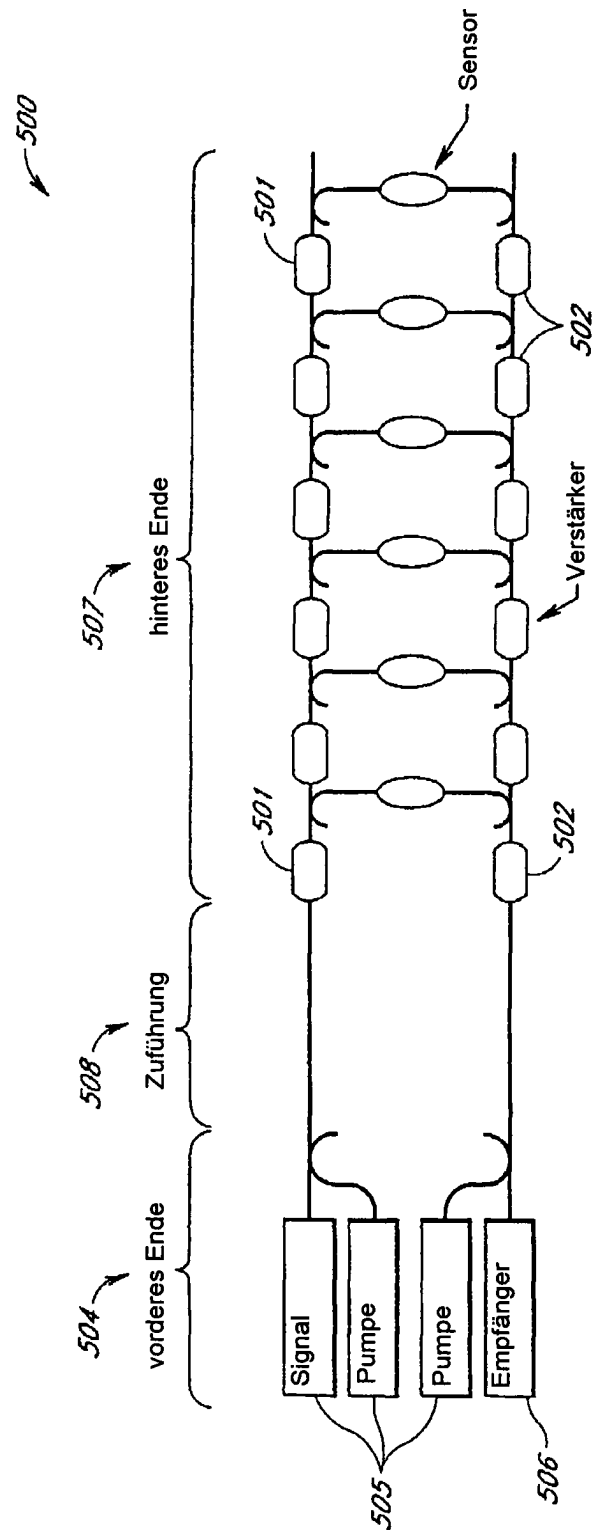


Fig. 29

