



PCT

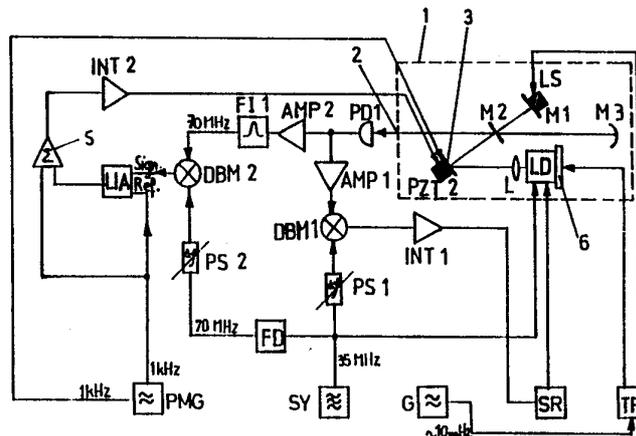
WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales Büro

INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

<p>(51) Internationale Patentklassifikation ⁵ : H01S 3/133, 3/139</p>	<p>A1</p>	<p>(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 92/11672 (43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 9. Juli 1992 (09.07.92)</p>
<p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/AT91/00135 (22) Internationales Anmeldedatum: 18. Dezember 1991 (18.12.91) (30) Prioritätsdaten: A 2608/90 20. Dezember 1990 (20.12.90) AT (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): TABARELLI, Werner [AT/LI]; Landstraße 152, FL-9494 Schaan (LI). (72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US) : TELLE, Harald [DE/DE]; Krögerstraße 16, D-3300 Braunschweig (DE). (74) Anwälte: TORGGLER, Paul usw. ; Wilhelm-Greilstrasse 16, A-6020 Innsbruck (AT).</p>	<p>(81) Bestimmungsstaaten: AT (europäisches Patent), BE (europäisches Patent), CH (europäisches Patent), DE (europäisches Patent), DK (europäisches Patent), ES (europäisches Patent), FR (europäisches Patent), GB (europäisches Patent), GR (europäisches Patent), IT (europäisches Patent), LU (europäisches Patent), MC (europäisches Patent), NL (europäisches Patent), SE (europäisches Patent), US. Veröffentlicht <i>Mit internationalem Recherchenbericht. Vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche zugelassenen Frist. Veröffentlichung wird wiederholt falls Änderungen eintreffen.</i></p>	

(54) Title: **DEVICE FOR STABILIZING A LASER LIGHT SOURCE**

(54) Bezeichnung: **EINRICHTUNG ZUR STABILISIERUNG EINER LASERLICHTQUELLE**



(57) Abstract

Proposed is a laser light source stabilization device in which the light intensity in the laser resonator changes the resonator's optical path length. The device is particularly suitable for the stabilization of a laser diode (LD). It includes an external resonator (M1, M2, M3), located outside the laser resonator, for the frequency-selective feedback of light from the laser light source (LD) to the laser resonator. Also included is a first control device for the control of at least one parameter affecting the emission frequency of the freely running laser light source (LD) (the injection current in a laser diode). The device further includes a control device for the control of the phase relationship of the light fed back by the external resonator to the laser resonator (feedback phase) relative to the phase of the light in the laser resonator, plus a modulation device for the modulation of a parameter affecting the emission frequency of the free-running laser light source (the injection current in a laser diode). In order to obtain an independent control signal for the control of the feedback phase, the invention calls for a detector (PD1, AMP2, FI1, DBM2, PS2, FD) for the detection, in the light emitted by the laser light source, of a modulation with twice the frequency ($2f_{mod}$), the detector feeding to the control device (PMG, LIA INT1, PZT2,3) a control signal dependent on the amplitude of this modulation for control of the feedback phase.

(57) Zusammenfassung Einrichtung zur Stabilisierung einer Laserlichtquelle, bei der die Lichtintensität im Laserresonator dessen optische Länge verändert, insbesondere zur Stabilisierung einer Laserdiode (LD). Die Einrichtung umfaßt einen außerhalb des Laserresonators angeordneten, externen Resonator (M1, M2, M3) zur frequenzselektiven Rückkoppelung von aus der Laserlichtquelle (LD) stammendem Licht in den Laserresonator. Weiters ist eine erste Regeleinrichtung zur Regelung zumindest eines die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserlichtquelle (LD) verändernden Betriebsparameters (Injektionsstrom einer Laserdiode) vorgesehen. Außerdem umfaßt die Einrichtung eine Regelung der Phasenlage (Rückkoppelphase) des vom externen Resonator in den Laserresonator zurückgekoppelten Lichtes relativ zur Phasenlage des Lichtes im Laserresonator sowie eine Modulationseinrichtung zur Modulation eines die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserlichtquelle verändernden Betriebsparameters (Injektionsstrom einer Laserdiode). Zur Gewinnung eines unabhängigen Regelsignals zur Regelung der Rückkoppelphase ist vorgesehen, daß eine Detektoreinrichtung (PD1, AMP2, FI1, DBM2, PS2, FD) zur Detektion einer Modulation mit der doppelten Modulationsfrequenz ($2f_{\text{mod}}$) in dem von der Laserlichtquelle emittierten Licht vorgesehen ist, wobei diese Detektoreinrichtung ein vom Modulationshub der genannten Modulation abhängiges Regelsignal an die Regeleinrichtung (PMG, LIA, INT1, PZT2,3) zur Regelung der Rückkoppelphase abgibt.

LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Code, die zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AT	Österreich	ES	Spanien	ML	Mali
AU	Australien	FI	Finnland	MN	Mongolei
BB	Barbados	FR	Frankreich	MR	Mauritanien
BE	Belgien	GA	Gabon	MW	Malawi
BF	Burkina Faso	GB	Vereinigtes Königreich	NL	Niederlande
BG	Bulgarien	GN	Guinea	NO	Norwegen
BJ	Benin	GR	Griechenland	PL	Polen
BR	Brasilien	HU	Ungarn	RO	Rumänien
CA	Kanada	IT	Italien	SD	Sudan
CF	Zentrale Afrikanische Republik	JP	Japan	SE	Schweden
CG	Kongo	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	SN	Senegal
CH	Schweiz	KR	Republik Korea	SU ⁺	Soviet Union
CI	Côte d'Ivoire	LI	Liechtenstein	TD	Tschad
CM	Kamerun	LK	Sri Lanka	TG	Togo
CS	Tschechoslowakei	LU	Luxemburg	US	Vereinigte Staaten von Amerika
DE	Deutschland	MC	Monaco		
DK	Dänemark	MG	Madagaskar		

+ Die Bestimmung der "SU" hat Wirkung in der Russischen Föderation. Es ist noch nicht bekannt, ob solche Bestimmungen in anderen Staaten der ehemaligen Sowjetunion Wirkung haben.

Einrichtung zur Stabilisierung einer Laserlichtquelle

Die Erfindung betrifft eine Einrichtung zur Stabilisierung einer Laserlichtquelle, bei der die Lichtintensität im Laserresonator dessen optische Länge verändert, insbesondere zur Stabilisierung einer Laserdiode, wobei die Einrichtung umfaßt:

- einen außerhalb des Laserresonators angeordneten, externen Resonator zur frequenzselektiven Rückkoppelung von aus der Laserlichtquelle stammendem Licht in den Laserresonator,

- eine Regeleinrichtung zur Regelung zumindest eines die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserlichtquelle verändernden Betriebsparameters, insbesondere des Injektionsstroms einer Laserdiode,

- eine Regeleinrichtung zur Regelung der Phasenlage

(Rückkoppelphase) des vom externen Resonator in den Laserresonator zurückgekoppelten Lichtes relativ zur Phasenlage des Lichtes im Laserresonator,

- eine Modulationseinrichtung zur Modulation eines die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserlichtquelle verändernden Betriebsparameters, insbesondere des Injektionsstroms einer Laserdiode.

Für zahlreiche Anwendungen, insbesondere zur Realisierung eines absolute Entfernungen messenden Interferometers, ist man an schmalbandigen und kontinuierlich über einen möglichst großen Frequenzbereich durchstimmbaren Laserlichtquellen interessiert. Hierzu eignen sich im Prinzip Laserdioden sehr gut, da sie einen großen Verstärkungsbereich aufweisen, und auch auf einer einzelnen longitudinalen Mode laufen können. Allerdings lassen sich freilaufende Laserdioden, also Laserdioden, die ohne externe optische Rückkoppelung lediglich über ihre Betriebsparameter (Injektionsstrom bzw. Lasertemperatur) durchgestimmt werden, nicht über einen großen Frequenzbereich (in der Größenordnung von 100 GHz und darüber) durchstimmen. Vielmehr kommt es bei einem derartigen Durchstimmen über die Laserbetriebsparameter zu sprunghaften, nicht phasenverfolgbaren Veränderungen der Emissionsfrequenz. Außerdem liegt aufgrund des hohen Frequenzrauschens (große Linienbreite) die Kohärenzlänge typischer, freilaufender

Einmoden-Laserdioden deutlich unter einem Meter, womit diese Laserdioden beispielsweise für Entfernungsmessungen über längere Strecken nicht geeignet sind.

5 Es ist bereits bekannt, daß sich durch schwache frequenzselektive optische Rückkopplung aus einem externen Resonator das Frequenzrauschen von Laserdioden breitbandig reduzieren läßt, womit man eine wesentlich schmalere Linienbreite und damit eine höhere Kohärenzlänge erhält. Durch eine derartige frequenzselektive optische Rückkopplung aus einem externen Resonator, wie sie beispielsweise in der Arbeit "Frequency stabilization of semiconductor lasers by resonant optical feedback", B. Dahmani et al., Optics Letters, Vol.12, No.11, November 1987, Seiten 876 bis 10 878, beschrieben ist, erzielt man in einem um die Resonanzmittelfrequenz des externen Resonators liegenden Einrastbereich ein Einrasten der tatsächlich von der Laserdiode emittierten Frequenz auf die Resonanzmittelfrequenz. Mit anderen Worten sorgt die frequenzselektive optische Rückkopplung dafür, daß auch bei Betriebsparametern, bei denen die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserdiode (also ohne optische Rückkopplung von außen), 15 innerhalb eines bestimmten Bereichs (nämlich dem Einrastbereich) neben der Resonanzmittelfrequenz liegt, eine tatsächliche Emissionsfrequenz, die praktisch auf der Resonanzmittelfrequenz liegt. Prinzipiell reicht die frequenzselektive optische Rückkopplung alleine aus, um die Emission der Laserdiode zu stabilisieren, d.h. eine schmalbandige Emissionslinie auf der Resonanzmittelfrequenz des externen Resonators zu halten. Durch äußere Störeinflüsse sowie Alterung der Laserdiode läßt sich eine Langzeitstabilität jedoch nur durch zusätzliche elektronische Regelungen erzielen. Solche elektronische Regelungen sind beispielsweise in der Arbeit "Design of an Optically Pumped Cs Laboratory Frequency Standard", E. de Clercq et al., Frequency Standards and Metrology, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1989, Seiten 20 120 bis 124, beschrieben. Zunächst ist eine Regeleinrichtung zur Regelung eines die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserdiode verändernden Betriebsparameter, insbesondere des Injektionsstromes vorgesehen. Diese Regelung stellt sicher, daß sich die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserdiode zumindest in dem 25 30 35

um die Resonanzmittenfrequenz des externen Resonators liegenden Einrastbereich liegt, sodaß die frequenzselektive optische Rückkopplung in der Lage ist, die tatsächliche Emissionsfrequenz auf die Resonanzmittenfrequenz des externen Resonators zu führen.

5 Stimmt die den momentanen Betriebsparametern entsprechende Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserdiode nicht exakt mit der Resonanzmittenfrequenz des externen Resonators überein, so weicht die tatsächliche Emissionsfrequenz (wegen der frequenzselektiven optischen Rückkopplung zwar nur geringfügig) doch etwas
10 von der Resonanzmittenfrequenz ab. Diese Abweichung kann erfaßt und daraus ein Regelsignal gewonnen werden, um die Betriebsparameter der Laserdiode so zu regeln, daß die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserdiode immer genau mit der Resonanzmittenfrequenz des externen Resonators übereinstimmt.

15

Neben der oben beschriebenen Regelung der Betriebsparameter der Laserdiode ist auch noch eine Regeleinrichtung zur Regelung der Phasenlage des vom externen Resonator in den Laserresonator zurückgekoppelten Lichtes relativ zur Phasenlage des Lichtes im
20 Laserresonator notwendig. Diese Regelung der Rückkoppelphase kann in an sich bekannter Weise durch Regelung des Abstandes von der Laserdiode zum externen Resonator, beispielsweise durch Führung des Lichtstrahles über einen piezoelektrisch verstellbaren Spiegel geschehen. Bei diesem Abstand kommt es weniger auf die
25 absolute Größe als vielmehr auf den von einem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge abweichenden Anteil (Rückkoppelphase) an. Zur weiter oben beschriebenen Regelung der Betriebsparameter und der erwähnten Regelung der Rückkoppelphase sind zwei unabhängige Regelkreise erforderlich. Die erwähnte Arbeit von E. de Clercq et al. schlägt dazu vor, den Injektionsstrom der Laserdiode zu modulieren. Diese Modulation induziert eine Frequenzmodulation in dem von der Laserdiode emittierten Licht. Diese Frequenzmodulation wird in der Transmission des externen Resonators detektiert und daraus ein Regelsignal für die
30 Regelung der Rückkoppelphase ermittelt. Um ein davon unabhängiges Regelsignal zur Regelung der Betriebsparameter der Laserdiode zu erzielen (Regelung der Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserdiode auf den Einrastbereich bzw. genau auf die Reso-

nanzmittenfrequenz des externen Resonators) wird gemäß dem Vorschlag von de Clercq das in den Laserresonator zurückgekoppelte Licht über einen akustooptischen Modulator mit einer zweiten Frequenz amplitudenmoduliert. Durch Demodulation des vom externen Resonator transmittierte Lichtes bei der Summenfrequenz (Injektionsstrom-Modulationsfrequenz plus Modulationsfrequenz des akustooptischen Modulators) erhält man ein Regelsignal zur Regelung des Injektionsstromes und damit der Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserdiode. Versuche des Anmelders haben gezeigt, daß selbst mit teuren akustooptischen Modulatoren nur sehr geringe Signal-Rauschabstände für das Regelsignal zu erreichen sind. Man kann damit nur geringe Regelbandbreiten erzielen, die allenfalls ausreichen, um einen Festfrequenzlaser zu stabilisieren, wie es auch in dem erwähnten Artikel von de Clercq et al. der Fall ist.

Man ist jedoch insbesondere an über einen großen Frequenzbereich kontinuierlich (phasenverfolgbar) durchstimmbaren Lichtquellen interessiert. Dazu kann die Resonanzmittenfrequenz des externen Resonators durchgestimmt werden. Damit die optische Rückkopplung in der Lage ist, die tatsächliche Emissionsfrequenz der Laserdiode immer auf dieser Resonanzmittenfrequenz zu halten, muß über die oben beschriebene erste Regelung die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserdiode (beispielsweise über den Injektionsstrom) mitgeregelt werden, damit die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserdiode immer in dem um die Resonanzmittenfrequenz liegenden Einrastbereich liegt. Außerdem ist es nötig, in einem unabhängigen, zweiten Regelkreis die Rückkoppelphase zu regeln (vgl. die eingangs erwähnte Arbeit von Dahmani). Während die Bildung eines Regelsignals aus der Abweichung der tatsächlichen Emissionsfrequenz der Laserdiode von der Resonanzmittenfrequenz des externen Resonators und damit die Regelung der Frequenz der freilaufenden Laserdiode (beispielsweise über den Injektionsstrom) kein Problem darstellt, ist die Bereitstellung eines zweiten, unabhängigen Regelsignals für die Rückkoppelphase zur Realisierung eines schnell, breitbandig und vor allem phasenverfolgbar (d.h. ohne Modensprünge) durchstimmbaren Lichtquellensystems bisher nicht bekannt.

Aufgabe der Erfindung ist es daher, eine Einrichtung zur Stabilisierung einer Laserlichtquelle der eingangs genannten Gattung zu schaffen, mit der sich eine langzeitstabile bzw. schnell, 5 breitbandig und phasenverfolgbar durchstimmbare Lichtemission geringer Linienbreite erzielen läßt.

Dies wird erfindungsgemäß dadurch erreicht, daß eine Detektoreinrichtung zur Detektion einer Modulation mit der doppelten Mo- 10 dulationsfrequenz in dem von der Laserlichtquelle emittierten Licht vorgesehen ist, wobei diese Detektoreinrichtung ein vom Modulationshub der genannten Modulation abhängiges Regelsignal an die Regeleinrichtung zur Regelung der Rückkoppelphase abgibt.

Die erfindungsgemäß Maßnahme erlaubt es, neben der Regelung der 15 Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserlichtquelle über Veränderung eines Betriebsparameters ein unabhängiges Regelsignal zur Regelung der Rückkoppelphase zu gewinnen, und damit eine langzeitstabile bzw. rasch und breitbandig phasenverfolgbar durch- 20 stimmbare Laserlichtquelle zu realisieren.

Die Grundidee ist dabei die folgende: Durch Modulation eines Betriebsparameters der Laserlichtquelle, der die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserlichtquelle beeinflusst, erzeugt man eine 25 Frequenzmodulation in dem von der Laserlichtquelle emittierten Licht. Bei Verwendung einer Laserdiode kann man beispielsweise den Injektionsstrom einem kleinen hochfrequenten Wechselstrom überlagern. Der Hub dieser Frequenzmodulation wird im Vergleich zu einer freilaufenden Laserdiode durch die frequenzselektive 30 optische Rückkopplung aus dem externen Resonator stark unterdrückt, beispielsweise um etwa den Faktor 50. Die dem Injektionsstrom überlagerte Wechselstromamplitude kann beispielsweise so gewählt werden, daß der Modulationsindex, also das Verhältnis Modulationshub zu Modulationsfrequenz, bei optimaler Einstellung der Rückkoppelparameter klein gegenüber 1 ist. In diesem Fall 35 besteht das optische Frequenzspektrum der Laserlichtquelle aus einem zentralen Träger und symmetrisch dazu angeordneten Seitenbändern im Abstand der Modulationsfrequenz und ganzzahligen

Vielfachen davon. Die relative Stärke der Seitenbänder wird bestimmt durch das Quadrat der Besselfunktion entsprechender Ordnung, wobei der Modulationsindex das Argument der Besselfunktion ist.

5

Bei perfekter Frequenzmodulation gibt es im Photostrom einer Photodiode (Photodetektor), die das von der Laserlichtquelle emittierte Licht detektiert, keine Wechselkomponente mit der Modulationsfrequenz oder Vielfachen davon. Dieser Umstand rührt daher, daß sich die aus der Überlagerung der einzelnen Seitenbänder untereinander bzw. mit dem Träger ergebenden Schwebungskomponenten gerade zu Null addieren. Bei den Seitenbändern erster Ordnung sind die Schwebungssignale zwischen Träger und rechtem Seitenband und Träger und linkem Seitenband vom Betrag her gleich, haben jedoch ein entgegengesetztes Vorzeichen. Die Kompensation der Schwebungssignale mit der doppelten Modulationsfrequenz kann man sich folgendermaßen vorstellen: Das Schwebungssignal zwischen den beiden Seitenbändern erster Ordnung wird durch die konstruktive Superposition der beiden Schwebungssignale des rechten und linken Seitenbandes zweiter Ordnung mit dem Träger kompensiert. Diese Kompensation ist allerdings nicht mehr gegeben, wenn die Stärke eines der beiden Seitenbänder zweiter Ordnung von dem Wert abweicht, den die Besselfunktion zweiter Ordnung für den betreffenden Modulationsindex vorschreibt.

25

Wenn bei der Regelung der tatsächlich von der Laserdiode emittierten Frequenz (Systemfrequenz) auf die Resonanzmittelfrequenz des externen Resonators die Rückkoppelphase von ihrem optimalen Wert (bei dem der Feldvektor des zurückgekoppelten Lichtes senkrecht zum Feldvektor des Lichtes im Laserresonator steht) wegdriftet, taucht in dem (vom externen Resonator reflektierten) Licht eine Amplitudenmodulation mit der doppelten Modulationsfrequenz auf. Eine mögliche Erklärung dafür besteht darin, daß bei nicht optimaler Rückkoppelphase zumindest ein Seitenband zweiter Ordnung außerhalb des Einrastbereiches gerät (wie bereits erwähnt, ist der Einrastbereich durch jene maximale Abweichung der Laserdiodenfrequenz von der Resonatormittelfrequenz

35

des externen Resonators definiert, für die es bei geeigneter Rückkoppelphase noch zu einer effektiven Rauschverminderung bzw. Verschmälerung der Linienbreite kommt). Wenn ein Seitenband zweiter Ordnung außerhalb des Einrastbereiches gerät, wird das betreffende Seitenband zweiter Ordnung durch die optische Rückkopplung aus dem externen Resonator nicht mehr so effizient unterdrückt, die bei einer idealen Frequenzmodulation vorhandene Kompensation der Seitenbandbeiträge ist nicht mehr möglich, und es entsteht in dem von der Laserdiode emittiertem Licht eine Amplitudenmodulation mit der doppelten Modulationsfrequenz, die im Photostrom nachweisbar ist. Erfindungsgemäß kann nun eine Detektoreinrichtung zur Detektion dieser Amplitudenmodulation mit der doppelten Modulationsfrequenz vorgesehen sein, wobei aus der Größe dieser Amplitudenmodulation (Modulationshub) ein Regelsignal für die Regeleinrichtung zur Regelung der Rückkoppelphase gewonnen wird. Die Regeleinrichtung verstellt dann automatisch immer die Rückkoppelphase bis die Amplitudenmodulation bei der doppelten Modulationsfrequenz einen vorbestimmten Wert bzw. ein Minimum annimmt, bei dem die Rückkoppelphase optimal steht.

Zu der in dem vom externen Resonator auftauchenden Amplitudenmodulation mit der doppelten Modulationsfrequenz könnte noch ein anderer Effekt beitragen:

Das von der Laserdiode emittierte Licht ist aufgrund der Modulation des Injektionsstroms frequenzmoduliert, wobei die Intensität der Seitenbänder erster und zweiter Ordnung auch von der Rückkoppelphase abhängt. Bei optimaler Rückkoppelphase sind alle Seitenbänder stark unterdrückt. Weicht die Rückkoppelphase vom optimalen Wert ab, so wird sich die Intensität der Seitenbänder erhöhen und damit auch der Modulationshub der Frequenzmodulation. Selbst wenn die Beeinflussung der Seitenbänder erster und zweiter Ordnung durch eine sich verändernde Rückkoppelphase der optischen Rückkopplung so "gleichmäßig" erfolgte, daß es bei einer reinen Frequenzmodulation in dem von der Laserdiode emittierten Licht bliebe, könnte man in dem vom externen Resonator reflektierten Licht eine von der Rückkoppelphase abhängige Amplitudenmodulation bei der doppelten Modulationsfrequenz sehen. Dies rührt daher, daß der externe Resonator einen auf seine Re-

sonanzmittelfrequenz stehenden Träger des frequenzmodulierten Lichtes schwächer reflektiert als die Seitenbänder. Während dies im reflektierten Licht bei der einfachen Modulationsfrequenz keine Auswirkungen hat, taucht durch die Abschwächung des Trägers eine Amplitudenmodulation mit der zweiten Modulationsfrequenz im reflektierten Licht auf. Der Modulationshub dieser Amplitudenmodulation spiegelt den Modulationshub der auf den Resonator aus der Laserdiode auftreffenden Frequenzmodulation wider, welcher seinerseits von der Rückkoppelphase abhängt.

10

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung kann vorgesehen sein, daß die Detektoreinrichtung einen Photodetektor und eine diesem nachgeschalteten Mischer umfaßt, der neben einem Signaleingang für den gegebenenfalls verstärkten Photostrom aus dem Photodetektor einen Referenzeingang zum Empfang eines aus der Modulationseinrichtung stammenden, und über einen Frequenzverdoppler geführten Referenzsignals mit der doppelten Modulationsfrequenz aufweist. Damit ist es möglich, das vom Photodetektor abgegebene Wechselstromsignal ins Basisband umzusetzen und als Fehlersignal für den Rückkoppelphasen-Regelkreis zu verwenden. Grundsätzlich ist eine Regelung über eine

15

20

Flankenstabilisierung möglich. Günstiger ist es aber, zur Ermittlung eines Regelsignals für die Rückkoppelphasenregelung eine Modulationsmethode vorzunehmen. Dazu ist gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung vorgesehen, daß eine Phasenmodulationseinrichtung zur kleinhubigen Modulation der Rückkoppelphase vorgesehen ist, und daß weiters eine phasensensitive Detektoreinrichtung vorgesehen ist, die aus einem mit der Phasenmodulationsfrequenz oszillierenden, den momentanen Modulationshub der (Amplituden)Modulation bei der doppelten Modulationsfrequenz wiedergebenden Signal ein Regelsignal ungerader Symmetrie für die Regeleinrichtung zur Regelung der Rückkoppelphase bereitstellt. Während die Strommodulationsfrequenz vorteilhaft in der Größenordnung von 10 bis 100 MHz liegt, ist die durch die Phasenmodulationseinrichtung hervorgerufene Phasenmodulationsfrequenz der Rückkoppelphase wesentlich kleiner und vorzugsweise im kHz-Bereich angesiedelt. Die Modulation der Rückkoppelphase ist auf einfache Weise dadurch möglich, daß der Laserstrahl zwi-

30

35

schen Laserdiode und externem Resonator über einen piezoelektrisch verstellbaren Spiegel geführt wird, der mit der Phasenmodulationsfrequenz periodisch um kleine Bruchteile einer Wellenlänge verstellt wird. Durch phasensensitive Detektion
5 (beispielsweise mit einem Lock-in-Verstärker) dieser niederfrequenten Wechselkomponente im Basisbandsignal, das den momentanen Modulationshub der (Amplituden)Modulation bei der doppelten Modulationsfrequenz wiedergibt, erhält man ein Regelsignal (Fehlersignal) mit ungerader Symmetrie, das der Regeleinrichtung
10 zur Regelung der Rückkoppelphase zugeführt wird. Dieses Regelsignal tritt als Produkt zweier von außen vorgenommenen Modulationen auf und ist damit weitgehend immun gegenüber technischen Störungen, Offsets usw. Die Regeleinrichtung für die Rückkoppelphase fährt dann in Abhängigkeit von diesem Regelsignal
15 beispielsweise den erwähnten piezoelektrisch verstellbaren Spiegel so nach, daß die Rückkoppelphase optimal steht.

Die soeben beschriebene Regelung der Rückkoppelphase unter Auswertung einer bei der zweifachen Modulationsfrequenz auftauchenden (Amplituden)Modulation weist eine hohe Regelbandbreite auf
20 und ist damit insbesondere für Systeme geeignet, bei denen die Emissionsfrequenz über einen Durchstimmbereich in der Größenordnung von 100 GHz und darüber phasenverfolgbar (und möglichst schnell) durchgestimmt werden soll. Eine solche Durchstimmung
25 kann durch Durchstimmen der Resonanzmittelfrequenz des externen Resonators durchgeführt werden, wobei eine erste Regeleinrichtung dafür sorgt, daß die Betriebsparameter der Laserlichtquelle gerade so synchron mitgeführt werden, daß die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserdiode immer innerhalb des sich nun mit
30 der Resonanzmittelfrequenz mitbewegenden Einrastbereichs liegt. Ein zweiter Regelkreis hält während des Durchstimmens der Frequenz die Rückkoppelphase auf ihrem optimalen Wert.

Die erfindungsgemäße Regelung der Rückkoppelphase durch Auswertung der bei der doppelten Modulationsfrequenz auftauchenden
35 (Amplituden)Modulation setzt eine Modulation der die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserdiode bestimmenden Betriebsparameter bzw. eines dieser Betriebsparameter (beispielsweise des

Injektionsstroms) voraus. Mit dieser Modulation kommt es, wie bereits erwähnt, zu einer Frequenzmodulation des von der Laserdiode emittierten Lichts, wobei das Frequenzspektrum neben der Trägerfrequenz natürlich auch symmetrisch dazu liegende Seitenbänder erster Ordnung aufweist. Bei einer idealen Frequenzmodulation heben sich die Schwebungssignale zwischen dem Träger und dem linken Seitenband erster Ordnung und zwischen dem Träger und dem rechten Seitenband erster Ordnung genau auf. Durch diese "Balance" ist zunächst keine Amplitudenmodulation sichtbar.

5

Weicht jedoch die Trägerfrequenz von der Resonanzmittelfrequenz des externen Resonators ab, so kommt es in dem vom Resonator reflektierten Licht zu einer Störung der genannten "Balance" zwischen Träger und Seitenbändern erster Ordnung und es ergibt sich eine für einen Photodetektor nachweisbare Amplitudenmodulation mit der einfachen Modulationsfrequenz. Durch eine phasenempfindliche Gleichrichtung kann man gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ein vom Modulationshub und der Phasenlage der genannten Amplitudenmodulation mit der einfachen Modulationsfrequenz abhängiges Regelsignal zur Regelung zumindest eines Betriebsparameters der Laserlichtquelle abgeben.

10

15

20

Zur Regelung eines oder mehrerer Betriebsparameter der Laserdiode in Abhängigkeit von einer Abweichung der tatsächlich emittierten Frequenz von der Resonanzmittelfrequenz des Resonators gibt es mehrere Möglichkeiten, z.B. ein polarisationsoptisches Phasenbrückenverfahren oder ein Intensitätsdifferenzverfahren. Das obengenannte Modulationsverfahren, bei dem man eine Amplitudenmodulation mit der einfachen Modulationsfrequenz in dem vom Resonator reflektierten Licht auswertet, ist im vorliegenden Fall jedoch besonders günstig, weil man erfindungsgemäß ohnehin die Frequenz der freilaufenden Laserdiode über die Betriebsparameter moduliert, um die erfindungsgemäße Rückkoppelphasenregelung durchführen zu können. Dabei treten automatisch auch die Seitenbänder erster Ordnung auf, die letztlich zusammen mit dem Träger in dem vom Resonator reflektierten Licht zu einer Amplitudenmodulation führen, wenn die tatsächliche Emissionsfrequenz der Laserdiode von der Resonanzmittelfrequenz des externen Resonators abweicht, wobei man für den Modulationshub der genannten

25

30

35

Amplitudenmodulation mit der einfachen Modulationsfrequenz einen dispersionskurvenähnlichen Verlauf über der Frequenz erhält.

5 Mit einem noch nicht optimierten Versuchsaufbau der erfindungs-
gemäßen konnte bereits ein kontinuierlich phasenverfolgbarer
Frequenzabstimmbereich von über 100 GHz erreicht werden. Durch
Optimierung der verwendeten Komponenten und insbesondere durch
Verwendung eines sogenannten Modenselektors kann der Abstimmbe-
reich noch um ein Mehrfaches erweitert werden. Ein solcher Mo-
10 denselektor ist ein externer Reflektor, der in der Nähe des La-
serdiodenresonators angeordnet ist. Soll die Frequenz durchge-
stimmt werden, so muß auch der Abstand dieses Reflektors zum La-
serdiodenresonator mitgefahren werden. Dazu ist ein dritter Re-
gelkreis erforderlich (Der erste Regelkreis regelt ja beispiels-
15 weise den Injektionsstrom, sodaß die Frequenz der freilaufenden
Laserdiode in dem um die Resonanzmittenfrequenz des externen Re-
sonators liegenden Einrastbereich liegt; die zweite Regelung re-
gelt die Rückkoppelphase). Für die nun gemäß einer bevorzugten
Ausführungsform vorgesehene dritte Regelung des externen Reflek-
20 tors (Modenselektor) kann dieser auf einer Piezo-Keramik mon-
tiert sein und der Abstand zur Laserdiode moduliert werden, wo-
bei die Modulationsfrequenz in der Größenordnung von etwa 100 Hz
liegt. Es wurde beobachtet, daß die Leistung des vom teildurch-
lässig ausgebildeten Modenselektor transmittierten Lichts von
25 der Position des Modenselektors abhängt und daß man beim
Modulieren eine einer Resonanzlinie ähnliche Transmissionskurve
erhält. Das transmittierte Licht ist also moduliert, und es läßt
sich über eine phasenempfindliche Gleichrichtung ein Regelsignal
für das Nachfahren des Modenselektors gewinnen.

30

Das Modulieren des Modenselektors induziert eine geringe Fre-
quenzmodulation in der Laserlichtquelle. Um dies zu vermeiden,
kann gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung vor-
gesehen sein, daß eine Einrichtung zur Modulation mindestens
35 eines Betriebsparameters der Laserlichtquelle mit der Reflektor-
modulationsfrequenz vorgesehen ist, um die durch den im Abstand
von der Laserlichtquelle modulierten Reflektor in der Laser-
lichtquelle induzierte Frequenzmodulation zu kompensieren.

Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung werden in der nachfolgenden Figurenbeschreibung näher erläutert.

5 Die Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels der erfindungsgemäßen Einrichtung. Die Fig. 2 zeigt ein Diagramm zur Darstellung des Frequenzverhaltens einer Laserdiode mit und ohne frequenzselektive optische Rückkopplung und zur Darstellung des Einrastbereiches. Die Fig. 3 zeigt die
10 wesentlichen Komponenten eines Frequenzspektrums einer frequenzmodulierten Schwingung. Die Fig. 4 zeigt einen piezoelektrisch verstellbaren externen Modenselektor und dessen Regelkreis.

Bei dem in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiel ist das
15 eigentliche optische Lasersystem in dem von strichlierten Linien umgebenen Bereich 1 angeordnet und umfaßt im wesentlichen eine Laserdiode LD und einen V-förmigen Resonator mit Spiegel M1, M2 und M3, wobei im Strahlengang des Lichtes zwischen Laserdiode LD und externem Resonator ein Spiegel 3 und eine Kollimationslinse
20 L angeordnet ist. Die Laserdiode kann beispielsweise eine GaAlAs-Laserdiode mit einer Emissionswellenlänge von ca. 830 nm und einer Ausgangsleistung von ca. 15 mW sein. Der externe Resonator M1, M2, M3 ist ein sogenannter Fox-Smith-Resonator, bei dem nur das durch den Faltspiegel M2 durchtretende interne Feld in
25 die Laserlichtquelle LD zurückgekoppelt wird, während das am Faltspiegel reflektierte Licht in den eigentlichen Ausgangslichtstrahl des optischen Lasersystems geht. Alternativ könnten auch andere Resonatoren verwendet werden, bei denen das am Einkoppelspiegel reflektierte Licht nicht direkt zurück in die Laserdiode gelangt. Beispielsweise würde sich ein verkipptes konvokales Fabry-Perot-Etalon eignen. Bei einem experimentellen
30 Aufbau war die Resonatorlänge ca. 30 cm, der freie Spektralbereich ca. 500 MHz und die Finesse ca. 250. Der Rückkoppel-Pegel lag bei etwa -45 dB. Der Resonatorspiegel M1 ist auf einem Miniaturlautsprecher LS montiert, womit eine Längenänderung und damit eine Veränderung der Resonanzmittenfrequenz des externen
35 Resonators M1, M2, M3 möglich ist, ohne den Resonator wesentlich zu dejustieren. Grundsätzlich eignen sich auch andere Verstell-

mechanismen für einen Resonatorspiegel, beispielsweise piezoelektrische Verstellelemente.

Für die vorliegende Anmeldung werden folgende wesentliche Frequenzen definiert:

f_F bezeichnet die Frequenz der freilaufenden Laserdiode, also jene Frequenz, mit der die Laserdiode bei gegebenen Betriebsparametern (Injektionsstrom, Temperatur) ohne optische Rückkopplung aus einem externen Resonator laufen würde.

f_S bezeichnet die Systemfrequenz, d.h. die bei vorhandener Rückkopplung aus dem externen Resonator und den eingestellten Betriebsparametern tatsächlich emittierte Frequenz. (Da die tatsächlich emittierte Frequenz trotz optischer Rückkopplung aus dem externen Resonator leicht frequenzmoduliert ist, bezeichnet f_S genauer gesagt die zentrale Trägerfrequenz des von der Laserdiode tatsächlich emittierten Lichtes.)

f_R bezeichnet die durch die Länge des Resonators (und gegebenenfalls durch die Brechzahl des darin befindlichen Mediums) definierte Resonanzmittenfrequenz des externen Resonators.

Die frequenzselektive optische Rückkopplung aus dem externen Resonator M1, M2, M3 ist prinzipiell ohne zusätzliche elektronische Regelkreise in der Lage, die Systemfrequenz f_S auf der Resonanzmittenfrequenz f_R zu halten, sofern die Betriebsparameter (Injektionsstrom und Temperatur der Laserdiode) derart eingestellt sind, daß die dadurch definierte Frequenz der freilaufenden Laserdiode in dem um die Resonanzmittenfrequenz f_R des externen Resonators liegenden Einrastbereich liegt, also nicht zu weit von der Resonanzmittenfrequenz des externen Resonators abweicht. Dies wird im folgenden anhand der Fig. 2 näher erläutert.

In Fig. 2 ist die Systemfrequenz f_S (also die tatsächlich emittierte Frequenz) gegenüber der Frequenz der freilaufenden Laserdiode aufgetragen. Der Ursprung des in Fig. 2 gezeigten Achsenkreuzes liegt bei der Resonanzmittenfrequenz f_R des externen Resonators. Ohne frequenzselektive optische Rückkopplung ändert sich die Systemfrequenz linear mit der Frequenz der freilaufen-

den Laserdiode, wie dies durch die strichlierte Linie 4 angedeu-
tet ist. Die Gerade 4 läuft in Fig. 2 nur deshalb nicht genau
unter 45° zu den beiden Achsen, weil auf der X-Achse und der Y-
Achse eine unterschiedliche Teilung verwendet ist. Eine Längen-
5 einheit auf der X-Achse entspricht einem Fünffachen der Frequenz
derselben Längeneinheit auf der Y-Achse.

Durch eine frequenzselektive optische Rückkopplung aus einem ex-
ternen Resonator erhält man den durch die Linie 5 angedeuteten
10 Frequenzverlauf. Sind alle Komponenten des Systems optimal
"eingerastet", so stimmt die Systemfrequenz f_S mit der Frequenz
der freilaufenden Laserdiode f_F und der Resonanzmittenfrequenz
 f_R des externen Resonators überein. Man befindet sich also im
Koordinatenursprung der Fig. 2. Weicht nun die Frequenz der
15 freilaufenden Laserdiode beispielsweise durch eine geringe Ver-
änderung des Injektionsstroms oder der Temperatur von der Reso-
nanzmittenfrequenz des externen Resonators ab, so ändert sich
durch die frequenzselektive optische Rückkopplung die tatsäch-
lich emittierte Systemfrequenz innerhalb des mit 1 Einrastbe-
20 reichs kaum. Die frequenzselektive optische Rückkopplung sorgt
also dafür, daß die tatsächlich emittierte Systemfrequenz f_S
auch bei geringen Abweichungen der Frequenz der freilaufenden
Laserdiode im wesentlichen auf der Resonanzmittenfrequenz des
externen Resonators gehalten wird. Der Effekt der frequenzselek-
25 tiven optischen Rückkopplung läßt sich vereinfacht wie folgt er-
klären: Stimmen alle Frequenzen f_S , f_F und f_R überein, so steht
der Feldvektor des zurückgekoppelten Lichtes unter 90° zum Feld-
vektor im Laserresonator und es kommt dabei zu keiner wesentli-
chen Veränderung der Intensität im Laserresonator. Die Rückkop-
30 pelphase beträgt also 90° . Weicht nun die Systemfrequenz von der
Resonanzmittenfrequenz ab, so kommt es zu einer Veränderung der
Rückkoppelphase, wobei nun der Feldvektor des zurückgekoppelten
Lichtes mehr in bzw. gegen die Phase des Feldvektors des Laser-
resonatorlichtes steht. Damit kommt es zu einer Intensitätsände-
35 rung im Laserresonator. Diese verändert die Brechzahl des Laser-
resonators und damit dessen optische Länge, wobei sich die Emis-
sionsfrequenz gerade so ändert, daß sie sich wieder in Richtung
der Resonanzmittenfrequenz f_R bewegt und wieder die Phasenlage

von 90° zwischen Laserdiodenresonatorfeld und zurückgekoppeltem Feld hergestellt ist.

In der Praxis reicht diese rein optische frequenzselektive Rückkopplung jedoch nicht aus, um die Laserdiode über längere Zeit auf der Resonanzmittenfrequenz zu halten. Insbesondere, wenn man die Resonanzmittenfrequenz durchstimmt und möchte, daß die frequenzselektive optische Rückkopplung bei diesem Durchstimmen die Systemfrequenz "mitzieht", sind zusätzliche elektronische Regelkreise erforderlich, um einerseits sicherzustellen, daß sich die über die Betriebsparameter festgelegte Frequenz f_F der freilaufenden Laserdiode zumindest im Einrastbereich 1 liegt (vorzugsweise auf die Resonanzmittenfrequenz f_R geregelt wird). Andererseits ist auch eine zusätzliche Regelung der Rückkoppelphase nötig, die die durch die optische Rückkopplung aus dem externen Resonator an sich automatisch vor sich gehende Phasenregelung unterstützt und sicherstellt, daß die Rückkoppelphase gerade so ist, daß das zurückgekoppelte Feld unter 90° zum Feld im Resonator der Laserdiode steht.

Eine erste Regeleinrichtung regelt über die Stromregelung SR den Injektionsstrom der Laserdiode LD gerade so, daß die Systemfrequenz f_S auf der Resonatormittenfrequenz f_R des externen Resonators M1, M2, M3 gehalten wird. (Die Temperatur der Laserdiode braucht nur grob vorgesteuert zu werden.) Diese Regeleinrichtung umfaßt eine Modulationseinrichtung zur Modulation des Injektionsstroms der Laserdiode. Die Modulationseinrichtung besteht im wesentlichen aus dem HF Synthesizer SY, der eine kleine Wechselstromkomponente mit einer Modulationsfrequenz von 35 MHz liefert. Die Modulationsfrequenz ist mit f_{mod} bezeichnet. Durch diese Injektionsstrommodulation wird eine Frequenzmodulation des von der Laserdiode emittierten Lichtes erzeugt, sodaß das Emissionsspektrum im wesentlichen so aussieht, wie es in Fig. 3 dargestellt ist: neben der Systemträgerfrequenz f_S liegen symmetrische Seitenbänder erster und zweiter Ordnung im Abstand der einfachen und doppelten Modulationsfrequenz f_{mod} . Seitenbänder höherer Ordnung können vernachlässigt werden und sind daher nicht näher dargestellt. Eine reine Frequenzmodulation ist - wie be-

reits eingangs erwähnt - durch einen Photodetektor nicht nachweisbar. Der externe Resonator M1, M2, M3 wirkt jedoch als Frequenzdiskriminator, wobei in dem vom Einkoppelspiegel M2 reflektierten Licht eine mit der einfachen Modulationsfrequenz f_{mod} oszillierende Amplitudenmodulation auftritt, wenn die Systemträgerfrequenz f_s neben der Resonatormittenfrequenz f_R liegt. Diese Amplitudenmodulation kann vom Photodetektor (beispielsweise einer Si-PIN-Photodiode PD1) detektiert werden, wobei der entstehende Photostrom die Amplitudenmodulationen des detektierten Lichtes wiedergibt. An dieser Stelle wäre zu erwähnen, daß das eigentliche Nutzlicht beispielsweise über einen nicht dargestellten Strahlteiler vor dem Photodetektor PD1 abgezweigt werden kann.

Der Photostrom aus dem Photodetektor PD1 wird im Verstärker AMP1 verstärkt und in einem doppelt-balancierten Mischer DBM1 synchron-demoduliert. Das dazu benötigte Referenzsignal mit der Modulationsfrequenz f_{mod} wird dabei ebenfalls dem HF-Synthesizer SY entnommen. Ein HF-Phasenschieber PS1 dient dazu, die benötigte Quadratur-Relation zwischen den beiden Mischereingängen herzustellen. PS1 kann auch durch die Wahl richtiger Kabellängen ersetzt werden. Das am Mischerausgang anliegende Regelsignal (Fehlersignal) welches proportional zur Abweichung der Systemfrequenz f_s von der Resonatormittenfrequenz f_R ist, wird nach Durchlaufen eines elektronischen Integrators INT1 über die Stromregelung SR auf die Laserdiode geführt. Damit ist der erste Regelkreis geschlossen.

Neben der eben beschriebenen Regelung der Systemfrequenz auf die Resonatormittenfrequenz folgt erfindungsgemäß eine Regelung der Rückkoppelphase des vom externen Resonator in den Laserresonator zurückgekoppelten Lichtes relativ zur Phasenlage des Lichtes im Laserresonator, wobei zur Gewinnung des dafür nötigen zweiten Regelsignals in dem von der Laserdiode emittierten Licht nach einer Amplitudenmodulation bei der zweifachen Modulationsfrequenz ($2f_{\text{mod}}$) geschaut wird. Wie bereits weiter oben ausgeführt, enthält die mit der zweifachen Modulationsfrequenz oszillierende Komponente eine Information über die Abweichung der Rückkoppel-

phase von ihrem optimalen Wert. Die Detektoreinrichtung zur Detektion dieser Amplitudenmodulation mit der doppelten Modulationsfrequenz umfaßt als wesentliche Elemente den Photodetektor PD1 und den Mischer DBM2, dem über den Frequenzverdoppler FD aus dem HF-Synthesizer SY ein mit der zweifachen Modulationsfrequenz ($2f_{\text{mod}} = 70 \text{ MHz}$) oszillierendes Referenzsignal zugeführt wird. Zur Einstellung der nötigen Quadratur-Phasenrelation zwischen den beiden Eingängen des Mixers DBM2 ist ein Phasenschieber PS2 vorgesehen. Das Ausgangssignal des Mixers DBM2 spiegelt den Modulationshub der Amplitudenmodulation mit der doppelten Modulationsfrequenz $2f_{\text{mod}}$ wieder und wird erfindungsgemäß zur Regelung der Rückkoppelphase verwendet. Bevor diese Regeleinrichtung der Rückkoppelphase beschrieben wird, sei noch erwähnt, daß vor dem Mischer DBM2 ein elektronisches Filter FI1 vorgesehen ist, das im wesentlichen nur die mit der doppelten Modulationsfrequenz $2f_{\text{mod}}$ schwingende Komponente des vom Verstärker AMP2 verstärkten Photostroms durchläßt. Verwendet man ein sehr selektives Filter, so könnte an Stelle des Mixers DBM2 auch eine Quadriereinrichtung vorgesehen sein (nicht gezeigt), in der das mit der doppelten Modulationsfrequenz modulierte Signal mit sich selbst multipliziert wird, um ein dem Modulationshub dieser Amplitudenmodulationskomponente entsprechendes Ausgangssignal zu liefern.

Zur Regelung der Rückkoppelphase wird der Piezo-Steller PZT2, auf dem der Spiegel 3 angebracht ist, mit einer aus dem Phasenmoduliergenerator stammenden Frequenz von etwa 1kHz kleinhubig moduliert, womit auch die Rückkoppelphase mit dieser Phasenmodulationsfrequenz kleinhubig moduliert wird. Die Phasenmodulationsfrequenz ist wesentlich kleiner als die Strom-Modulationsfrequenz f_{mod} , womit es zu keiner störenden gegenseitigen Beeinflussung kommt. Der Modulationshub liegt beispielsweise in 10nm-Bereich, was einem Rückkoppelphasenhub von ca. 100mrad entspricht. Die 1kHz-Komponente im DBM2-Ausgangssignal, das den momentanten Modulationshub der Amplitudenmodulation bei der doppelten Modulationsfrequenz $2f_{\text{mod}}$ wiedergibt, wird nun mit Hilfe einer phasensensitiven Detektoreinrichtung synchron-demoduliert, um ein Regelsignal ungerader Symmetrie zur

Regelung der Rückkoppelphase zu erhalten. Beim vorliegenden Ausführungsbeispiel ist die phasensensitive Detektoreinrichtung ein Lock-in-Verstärker, der auf einem Signaleingang das aus dem Mischer DBM2 stammende Signal empfängt und der weiters einen Referenzeingang aufweist, über den ein mit der Phasenmodulationsfrequenz oszillierendes Referenzsignal aus dem Phasenmodulationsgenerator empfangen wird. Das über den Lock-in-Verstärker erzeugte Signal wird nach Durchlaufen eines Summierers S und eines Integrators INT2 auf den Eingang des nicht näher dargestellten Hochspannungsverstärkers des Piezo-Stellers PZT2 geleitet, um den Spiegel 3 und damit die Rückkoppelphase auf den optimalen Wert zu verstellen. Damit ist der Rückkoppelphasenregelkreis geschlossen.

Wie aus Fig. 1 ersichtlich, ist die Detektoreinrichtung zur Detektion der mit der doppelten Modulationsfrequenz oszillierenden Komponente des modulierten Lichtes im Strahlengang des vom externen Resonators M1, M2, M3 reflektierten Lichtes angeordnet. Damit ist es möglich, für die Regelung der Systemfrequenz über die Betriebsparameter und die Regelung der Rückkoppelphase ein und denselben Photodetektor PD1 zu verwenden.

Durch die beiden beschriebenen Regelkreise bleibt das System praktisch unbegrenzt auf die Resonatormittenfrequenz des externen Resonators eingerastet und zwar auch dann, wenn die Resonanzmittenfrequenz des Resonators schnell (in der Größenordnung von einigen GHz pro Sekunde) und weit (in der Größenordnung von 100 GHz und darüber) durchgestimmt wird. Da der Regelhub des ersten Regelkreises (auf den Injektionsstrom) beschränkt ist, muß bei einem weiteren Durchstimmen der Resonatormittenfrequenz die Temperatur der Laserdiode grob mitgesteuert werden. Der erste Regelkreis stellt dann durch genaue Regelung des Injektionsstromes sicher, daß die Frequenz der freilaufenden Laserdiode exakt auf der Resonatormittenfrequenz bleibt. Damit läßt sich eine schmalbandige und phasenverfolgbar (also ohne Modensprünge) durchstimmbare Laserlichtquelle realisieren, wie sie beispielsweise in Interferometern zur absoluten Entfernungsmessung verwendet wird. Bei einem solchen Absolut-Interferometer entspricht

der Aufbau einem Zweistrahlinterferometer, wobei ein Arm die Meßstrecke darstellt. Die Anzahl der am Ort des Empfängers als Folge der Durchstimmung der Emissionsfrequenz durchlaufenden Interferenzstreifen wird gezählt. Simultan mißt man, um welchen Betrag sich die im Umgebungsmedium vorhandene Luftwellenlänge der emittierten Strahlung beim Durchstimmvorgang verändert. Der Absolutbetrag der Meßentfernung ergibt sich dann gerade aus der halben Anzahl der gezählten Interferenzstreifen dividiert durch die Differenz der Luftwellenzahlen ($1/\text{Luftwellenlänge}$) vor und nach dem Durchstimmen der Emissionsfrequenz.

Bei der in Fig. 1 dargestellten Einrichtung erfolgt die Verstellung der Resonanzmittelfrequenz des externen Resonators M1, M2, M3 über einen beweglichen Spiegel M1, der auf einem Lautsprecher LS montiert ist. Bei der Durchstimmung der Resonanzmittelfrequenz des externen Resonators M1, M2, M3 müssen die Betriebsparameter der Laserdiode geregelt bzw. mitgesteuert werden, damit die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserdiode immer im Mitziehbereich der sich nun ändernden Resonanzmittelfrequenz bleibt. Zur Durchstimmung über einen großen Frequenzbereich eignet sich zur groben Mitsteuerung insbesondere die Laserdiodontemperatur, die beispielsweise über ein Peltier-Element 6 festgelegt wird. Beim gezeigten Ausführungsbeispiel wird über einen Generator G beispielsweise ein periodischer oder linearer Temperatursollwertverlauf vorgegeben. Der Temperaturregler nimmt dann eine synchrone Verstellung der Temperatur der Laserdiode und der Lage des Resonatorspiegels M1 vor. Eine solche synchrone Verstellung (Mitsteuerung) ist natürlich nicht perfekt möglich. Die verbleibenden kleinen Abweichungen zwischen Systemfrequenz f_S und der Resonanzmittelfrequenz f_R des externen Resonators kann jedoch über die weiter oben beschriebene Regelung des Injektionsstroms schnell und exakt ausgeregelt werden.

Zu erwähnen wäre noch, daß man durch die Wahl einer speziellen Geometrie, bei der der Abstand der Laserdiode zum Einkoppelspiegel M2 gerade dem Abstand der Spiegel M2 und M3 entspricht, erzielen kann, daß eine einmal eingestellte Rückkoppelphase auch bei der Bewegung von M1 erhalten bleibt. In der Praxis arbeitet

diese "feed-forward"-Kompensation natürlich nicht perfekt. Die verbleibenden Fehler, die zum Beispiel durch Dispersionseffekte oder durch kleine temperaturabhängige Änderungen der Laserdi-
oden-Emissionsachse entstehen können, sind dagegen so klein, daß
5 sie leicht von der Rückkoppelphasenregelung ausgeregelt werden
können. Bei einem Experiment hat sich beispielsweise gezeigt,
daß bei einem Durchstimmen der Systemfrequenz über einen Bereich
von 200 GHz die Rückkoppelweglänge zwischen externem Resonator
und Laserdiode nur um weniger als eine halbe Wellenlänge nachge-
10 regelt werden mußte, was mit einem einfachen piezo-elektrischen
Stellelement PZT2 leicht möglich ist.

Um den phasenverfolgbaren Durchstimmbereich der Einrichtung noch
weiter zu erhöhen, kann gemäß einer bevorzugten Ausführungsform
15 der Erfindung vorgesehen sein, daß zusätzlich zum externen Reso-
nator M1, M2, M3 außerhalb des Resonators der Laserlichtquelle
LD ein als Modenselektor wirkender externer Reflektor MS ange-
ordnet ist, der zumindest einen Teil des Lichtes in den Laserre-
sonator zurückreflektiert.

20 Insbesondere wenn man die Frequenz des Gesamtsystems durchstim-
men möchte, muß auch der Abstand dieses Modenselektors vom La-
serresonator mitgeregelt werden. Dazu ist ein dritter Regelkreis
vorgesehen, der in Fig. 4 schematisch dargestellt ist. Die Lage
25 des Modenselektors MS wird dabei durch die über den Operations-
verstärker OP2 zugeführte Spannung festgelegt. Über eine an den
Eingang dieses Operationsverstärkers OP2 angelegte Vorspannung
 U_{bias} kann eine Mode m manuell ausgewählt werden. Zur Gewinnung
eines Regelsignals, mit dem sich der Abstand des Modenselektors
30 von der Laserdiode regeln läßt, wird dieser Vorspannung eine Re-
flektormodulationsfrequenz in der Größenordnung von etwa 100Hz
überlagert. Damit wird der Abstand des Reflektors (Modenselektor
MS) moduliert. Der Reflektor MS ist teildurchlässig ausgebildet
und die transmittierte Leistung hängt vom Abstand des Reflektors
35 von der Laserdiode ab. Damit ist auch das vom Reflektor trans-
mittierte Licht mit der Reflektormodulationsfrequenz in der Grö-
ßenordnung von 100Hz amplitudenmoduliert. Der Photodetektor PD2
detektiert und diese Amplitudenmodulation führt ein entsprechen-

des Stromsignal dem Signaleingang S1 eines Lock-in-Verstärkers zu. Die Reflektormodulationsfrequenz U_{mod} wird dem Referenzeingang RI zugeführt. Der Lock-in-Verstärker demoduliert nun die Amplitudenmodulationskomponente bei der Reflektormodulationsfrequenz (phasenempfindliche Gleichrichtung) und gibt ein Regelsignal ab, das nach Integration in dem entsprechend beschalteten Operationsverstärker OP2 dem Eingang des Operationsverstärkers OP2 zugeführt wird, der dann über das Piezo-Element PZT dem Modenselektor auf den richtigen Abstand von der Laserlichtquelle einstellt. Damit ist der Modenselektorregelkreis geschlossen.

Da die Modulation des Modenselektors-Reflektors MS eine unter Umständen störende Frequenzmodulation in der Laserdiode induziert, kann gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung eine Einrichtung vorgesehen sein, die den Strom der Laserdiode geringfügig mit der Reflektormodulationsfrequenz moduliert und damit die durch den modulierten Reflektor MS induzierte Frequenzmodulation gerade zu kompensieren. Diese Einrichtung CC zur Strommodulation liefert einen Ausgangsstrom, der dem Injektionsstrom der in Fig. 1 gezeigten Regelungen überlagert wird.

Ein Neutralfilter NF verhindert störende Reflexion vom Photodetektor in die Laserdiode LD.

Die Fig. 5 zeigt einen typischen Verlauf des elektrischen Signals auf der Photodiode PD1 bei der doppelten Modulationsfrequenz ($S_{2f_{\text{mod}}}$) in Abhängigkeit von der Rückkoppelphase RKP, d. h. in Abhängigkeit von der Position des Piezoelementes PZT2, auf dem der Spiegel 3 montiert ist. Mit der oben beschriebenen Regelung erfolgt mittels einer Modulationsmethode (Modulation der Rückkoppelphase mit 1kHz durch PMG) eine Regelung auf das Extremum A. Der Vorteil dieser Modulationsmethode besteht darin, daß Schwankungen des Signalpegels nicht stören. Die Regeleinrichtung für die Rückkoppelphase kann daher die Position des Piezoelementes PZT2 immer genau derart einstellen, daß das Signal bei der doppelten Modulationsfrequenz $S_{2f_{\text{mod}}}$ das Extremum A annimmt und damit die Rückkoppelphase richtig steht.

Eine vereinfachte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Einrichtung ist in Fig. 6 gezeigt. Diese ist gegenüber der bisher beschriebenen Einrichtung in zweierlei Hinsicht vereinfacht.

5 Zunächst ist zu erwähnen, daß bei der in Fig. 6 gezeigten Einrichtung der erste Regelkreis, der die Betriebsparameter der Laserdiode LP regelt (AMP1, DBM1, PS1, SY, INT1, SR) gleich ist, wie bei dem in Fig. 1 gezeigten Ausführungsbeispiel und hier in Fig. 6 allgemein mit der Bezugsziffer 10 bezeichnet ist.

10 Eine Vereinfachung bei dem in Fig. 6 gezeigten Ausführungsbeispiel besteht erstens darin, daß durch Verwendung eines hochselektiven Filter FI1 bei der doppelten Modulationsfrequenz S_{fmod} (70 MHz) der Mischer DBM2 der Fig. 1 weggelassen ist. Zweitens erfolgt keine Modulation der Rückkoppelphase. Vielmehr erfolgt
15 eine "statische Regelung" auf die in Fig. 5 gezeigte Rückkoppelphase B, in dem das Signal bei der doppelten Modulationsfrequenz S_{2fmod} auf den Pegel C geregelt wird. Dazu ist dem Filter FI1 ein Gleichrichter 11 nachgeschaltet, dessen Ausgang zu einem Differenzverstärker 12 führt. Dem zweiten Eingang des Differenz-
20 verstärkers 12 wird ein Offsetsignal entsprechend dem Pegel C zugeführt. Der Ausgang des Differenzverstärkers 12 steuert dann das Piezoelement PZT2 an und legt damit die Lage der Rückkoppelphase fest.

25 Bei dem in Fig. 7 dargestellten Ausführungsbeispiel erfolgt ebenfalls keine Modulation der Rückkoppelphase, sondern eine Regelung auf den Wert B gemäß Fig. 5. Anstelle oder zusätzlich zum Filter FI1 bei der doppelten Modulationsfrequenz S_{2fmod} ist ein Doubly-Balanced-Mischer DBM2 vorgesehen, der einerseits das von
30 der Photodiode PD1 herkommende Signal und andererseits ein Referenzsignal mit der doppelten Modulationsfrequenz S_{2fmod} empfängt. Der Ausgang dieses Mischer DBM2 steuert über den Integrator INT2 das Piezoelement PZT2 an und regelt damit die Rückkoppelphase. Gegenüber dem in Fig. 6 dargestellten Ausführungs-
35 beispiel sind bei dem in Fig. 7 dargestellten Ausführungsbeispiel reduzierte Anforderungen an den Filter FI1 bei der doppelten Modulationsfrequenz gestellt. Er kann gegebenenfalls sogar ganz fortgelassen werden.

Bei den Ausführungsformen gemäß den Fig. 6 und 7 gehen Schwankungen des Signalpegels störend in die Regelung ein. Die bereits beim Ausführungsbeispiel der Fig. 1 angewandte Modulationsmethode (Modulation der Rückkoppelphase über PMG), mit welcher nicht auf einen bestimmten Pegel des bei der zweiten Modulationsfrequenz vorliegenden photoelektrischen Signals, sondern auf ein Extremum A geregelt wird, ist in dieser Hinsicht vorteilhafter und sicherer. Bei dem in Fig. 8 dargestellten Ausführungsbeispiel wird daher wie beim Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 1 ebenfalls eine Modulationsmethode angewandt. Gegenüber der Fig. 1 besteht jedoch eine Vereinfachung darin, daß kein Mischer DBM2 vorgesehen ist. Demgemäß kann auch der Frequenzverdoppler FD und der Phasenschieber PS2 entfallen. Es ist lediglich ein hochselektiver Filter FI1 bei der doppelten Modulationsfrequenz vorgesehen, dem ein Gleichrichter 11' nachgeschaltet ist.

Der übrige Aufbau entspricht im wesentlichen dem der Fig. 1. Bei dem in Fig. 8 dargestellten Ausführungsbeispiel erfolgt ebenfalls eine Regelung der Rückkoppelphase über eine Modulationsmethode durch Regelung des bei der zweiten Modulationsfrequenz vorliegenden photoelektrischen Signals auf das Extremum A der Fig. 5.

Die Erfindung ist selbstverständlich nicht auf die dargestellten Ausführungsbeispiele beschränkt. Vorteilhafte Laserlichtquellen sind sicherlich Laserdioden. Wesentlich ist aber die Eigenschaft der Lichtquelle, daß sich bei einer Lichtintensitätsänderung im Laserresonator dessen optische Länge verändert. Dies ist die Voraussetzung dafür, daß durch eine frequenzselektive optische Rückkoppelung ein Einrasten der Emissionsfrequenz auf die Resonanzmittelfrequenz des externen Resonators möglich ist. Wie bereits erwähnt, können anstelle des gezeigten V-förmigen Resonators auch andere Resonatoren beispielsweise gekippte konfokale Fabry-Perot-Etalons verwendet werden. Die Verstellung der Rückkoppelphase könnte beispielsweise auch über ein geregeltes Phasenschieberelement im Strahlengang zwischen externem Resonator und Laserlichtquelle geschehen.

P a t e n t a n s p r ü c h e :

1. Einrichtung zur Stabilisierung einer Laserlichtquelle (LD), bei der die Lichtintensität im Laserresonator dessen optische Länge verändert, insbesondere zur Stabilisierung einer Laserdiode, wobei die Einrichtung umfaßt:
- einen außerhalb des Laserresonators angeordneten, externen Resonator (M1, M2, M3) zur frequenzselektiven Rückkopplung von aus der Laserlichtquelle (LD) stammendem Licht in den Laserresonator,
 - eine Regeleinrichtung (PD1, AMP1, DBM1, PS1, INT1, SR) zur Regelung zumindest eines die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserlichtquelle (LD) verändernden Betriebsparameters, insbesondere des Injektionsstroms einer Laserdiode (LD),
 - eine Regeleinrichtung (PMG; LIA; 2; INT2, PZT2; 3) zur Regelung der Phasenlage (Rückkoppelphase) des vom externen Resonator (M1, M2, M3) in den Laserresonator zurückgekoppelten Lichtes relativ zur Phasenlage des Lichtes im Laserresonator,
 - eine Modulationseinrichtung (SY) zur Modulation eines die Emissionsfrequenz der freilaufenden Laserlichtquelle (LD) verändernden Betriebsparameters, insbesondere des Injektionsstroms einer Laserdiode (LD) mit einer Modulationsfrequenz (f_{mod}),
dadurch gekennzeichnet, daß eine Detektoreinrichtung (PD1, AMP2, FI1, DBM2, PS2, FD) zur Detektion einer Modulation mit der doppelten Modulationsfrequenz ($2f_{\text{mod}}$) in dem von der Laserlichtquelle emittierten Licht vorgesehen ist, wobei diese Detektoreinrichtung ein vom Modulationshub der genannten Modulation abhängiges Regelsignal an die Regeleinrichtung (PMG; LIA; S; INT2; PZT2; 3) zur Regelung der Rückkoppelphase abgibt.
2. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß einem Photodetektor (PD1) der Detektoreinrichtung gegebenenfalls unter Zwischenschaltung eines Verstärkers (AMP2) ein elektronisches Frequenzfilter (FI1) zur Ausfilterung der mit

der doppelten Modulationsfrequenz ($2f_{\text{mod}}$) schwingenden Komponente des aus der Laserlichtquelle (LD) stammenden Lichtes nachgeschaltet ist.

- 5 3. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß dem Frequenzfilter eine Quadriereinrichtung nachgeschaltet ist, in der das mit der doppelten Modulationsfrequenz ($2f_{\text{mod}}$) modulierte Signal mit sich selbst multipliziert wird.
- 10 4. Einrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Detektoreinrichtung einen Photodetektor (PD1) und eine diesem nachgeschaltete Mischer (DBM2) umfaßt, der neben einem Signaleingang für den gegebenenfalls verstärkten Photostrom aus dem Photodetektor (PD1) einen Referenzeingang
15 zum Empfang eines aus der Modulationseinrichtung (SY) stammenden, und über einen Frequenzverdoppler (FD) geführten Referenzsignals mit der doppelten Modulationsfrequenz ($2f_{\text{mod}}$) aufweist.
- 20 5. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Modulationsfrequenz (f_{mod}) in der Größenordnung von 10-100 MHz liegt.
- 25 6. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß eine Phasenmodulationseinrichtung (PMG) zur kleinhubigen Modulation der Rückkoppelphase vorgesehen ist, und daß weiters eine phasensensitive Detektoreinrichtung (LIA) vorgesehen ist, die aus einem mit der Phasenmodulationsfrequenz oszillierenden, den momentanen Modulationshub der Modulation bei der doppelten Modulationsfrequenz
30 ($2f_{\text{mod}}$) wiedergebenden Signal ein Regelsignal ungerader Symmetrie zur Regelung der Rückkoppelphase bereitstellt.
- 35 7. Einrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die phasensensitive Detektoreinrichtung, vorzugsweise ein Lock-in-Verstärker (LIA), einen Signaleingang zum Empfang eines den Modulationshub der Modulation bei der doppelten Modulationsfrequenz ($2f_{\text{mod}}$) wiedergebenden Signals aufweist und

weitere einen Referenzeingang zum Empfang eines mit der Phasenmodulationsfrequenz oszillierenden Referenzsignals aufweist.

- 5 8. Einrichtung nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Phasenmodulationsfrequenz wesentlich kleiner ist als die Modulationsfrequenz (f_{mod}) eines oder mehrerer Betriebsparameter der Laserlichtquelle und vorzugsweise im kHz-Bereich liegt.
- 10 9. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen externem Resonator (M1, M2, M3) und Laserlichtquelle (LD) in an sich bekannter Weise ein vorzugsweise piezoelektrisch (PZT2) verstellbarer Spiegel (3) zur Verstellung bzw. Modulation der Rückkoppelphase angeordnet ist.
- 15 10. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß der externe Resonator ein V-förmiger Fox-Smith-Resonator (M1, M2, M3) ist, bei dem nur das den Faltspiegel (Einkoppelspiegel M2) durchtretende interne Feld in die Laserlichtquelle (LD) zurückgekoppelt wird.
- 20 11. Einrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand zwischen dem Resonatorspiegel (M3), der nicht senkrecht zur Licht-Einkoppelrichtung durch den Faltspiegel (M2) steht, und dem Faltspiegel gleich der Entfernung vom Faltspiegel (M2) zur Laserlichtquelle (LD) ist.
- 25 12. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Detektoreinrichtung (PD1, AMP2, FI1, DBM2, PS2, FD) zur Detektion der mit der doppelten Modulationsfrequenz ($2f_{\text{mod}}$) oszillierenden Komponente des modulierten Lichtes im Strahlengang des vom externen Resonator (M1, M2, M3) reflektierten Lichtes aus der Laserlichtquelle (LD) angeordnet ist.
- 30 35

13. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Regeleinrichtung (PD1, AMP1, DBM1, PS1, INT1, SR) zur Regelung zumindest eines Betriebsparameters der Laserlichtquelle (LD) eine Detektoreinrichtung (PD1, AMP1, DBM1, PS1) zur Detektion einer Amplitudenmodulation mit der einfachen Modulationsfrequenz (f_{mod}) in dem vom externen Resonator (M1, M2, M3) reflektierten Licht umfaßt, wobei diese Detektoreinrichtung ein vom Modulationshub und der Phasenlage der genannten Amplitudenmodulation mit der einfachen Modulationsfrequenz (f_{mod}) abhängiges Regelsignal (A) zur Regelung zumindest eines Betriebsparameters der Laserlichtquelle (LD) abgibt.
14. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Resonanzmittenfrequenz (f_{R}) des externen Resonators (M1, M2, M3) durchstimbar ist.
15. Einrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß ein Spiegel des Resonators piezoelektrisch verstellbar ist.
16. Einrichtung nach Anspruch 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, daß der Durchstimmbereich in der Größenordnung von 100 GHz und darüber liegt.
17. Einrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß eine Einrichtung (G, TR) zur synchronen Veränderung der Resonanzmittenfrequenz (f_{R}) des externen Resonators (M1, M2, M3) einerseits und wenigstens eines der die Frequenz (f_{P}) der freilaufenden Laserlichtquelle (LD) verändernden Betriebsparameter andererseits vorgesehen ist.
18. Einrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserlichtquelle eine Laserdiode (LD) ist und der durchgestimmte Betriebsparameter die beispielsweise über ein oder mehrere Peltier-Elemente (6) festgelegte Temperatur der Laserdiode (LD) ist.

19. Einrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß das Durchstimmen der Resonanzmittenfrequenz im wesentlichen linear über der Zeit erfolgt.
- 5 20. Einrichtung nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Durchstimmgeschwindigkeit in der Größenordnung von einigen GHz pro Sekunde und darüber liegt.
- 10 21. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich zum externen Resonator (M1, M2, M3) außerhalb des Resonators der Laserlichtquelle (LD) ein als Modenselektor wirkender externer Reflektor (MS) angeordnet ist, der zumindest einen Teil des Lichtes in den Laserresonator zurückreflektiert (Fig. 4).
- 15 22. Einrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand des externen Reflektors (MS) vom Laserresonator (LD), vorzugsweise durch einen auf einem Piezo-Element (PZT) montierten Reflektor (MS), verstellbar ist.
- 20 23. Einrichtung nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß der externe Reflektor (MS) teildurchlässig ist und eine Regeleinrichtung (LIA, OP1, OP2, PZT) vorgesehen ist, die in Abhängigkeit von dem vom Reflektor (MS) transmittierten Licht eine Regelung des Abstandes zur Laserlichtquelle (LD) vornimmt.
- 25 24. Einrichtung nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, daß eine Reflektormodulationseinrichtung (OP2, PZT) zur periodischen Modulation des Reflektorabstandes von der Laserlichtquelle vorgesehen ist und daß weiters eine phasenempfindliche Gleichrichteinrichtung (LIA) zur Ermittlung eines Regelsignals zur Regelung des Reflektorabstandes von der Laserlichtquelle aus dem Photostrom des vom Reflektor (MS) transmittierten Lichtes vorgesehen ist.
- 30 35

25. Einrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Reflektormodulationsfrequenz in der Größenordnung von etwa 100 Hz liegt.
- 5 26. Einrichtung nach Anspruch 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, daß eine Einrichtung (CC) zur Modulation mindestens eines Betriebsparameters der Laserlichtquelle (LD) mit der Reflektormodulationsfrequenz vorgesehen ist, um die durch den im Abstand von der Laserlichtquelle modulierten Reflektor
10 (MS) in der Laserlichtquelle induzierte Frequenzmodulation zu kompensieren.

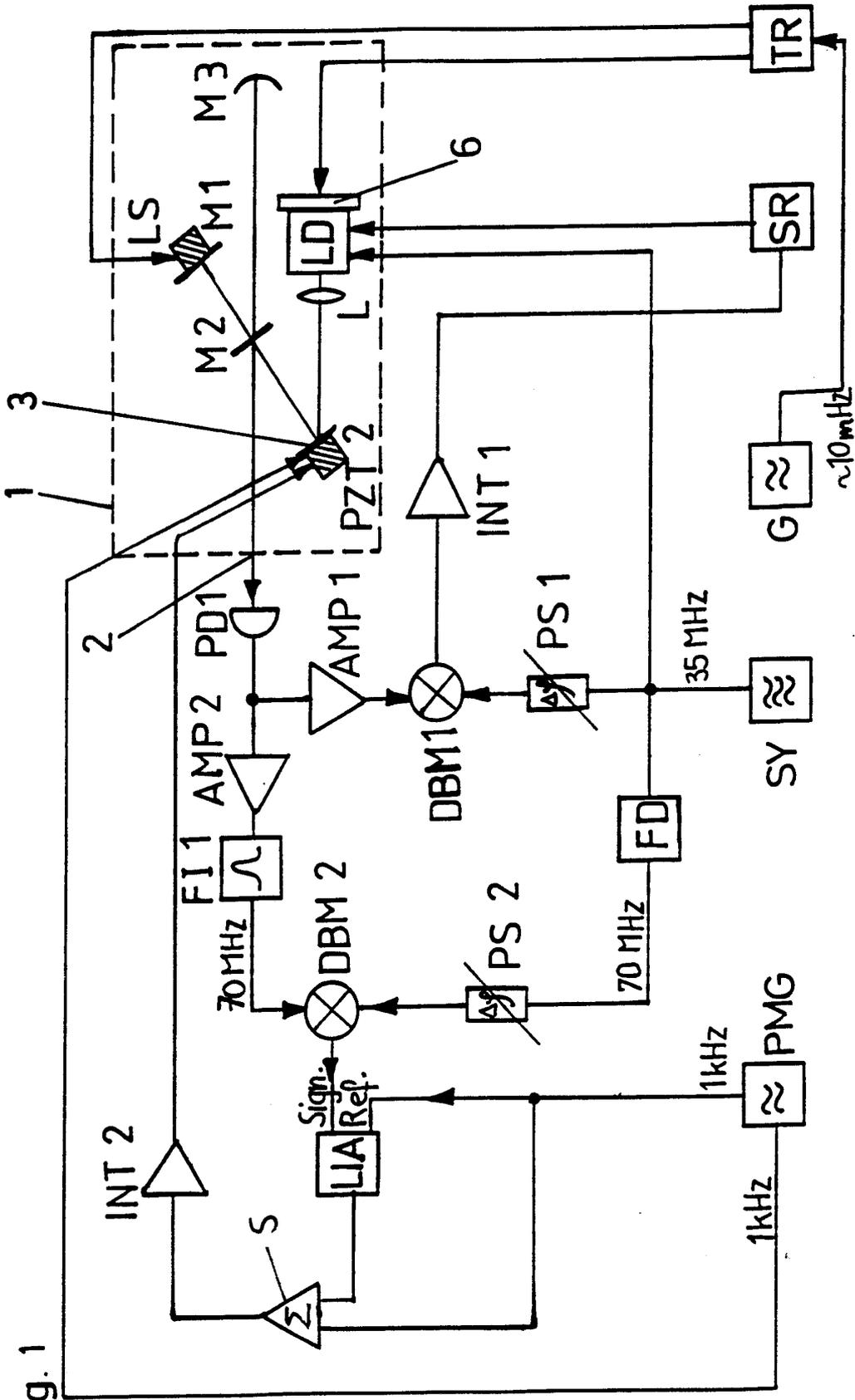


Fig. 1

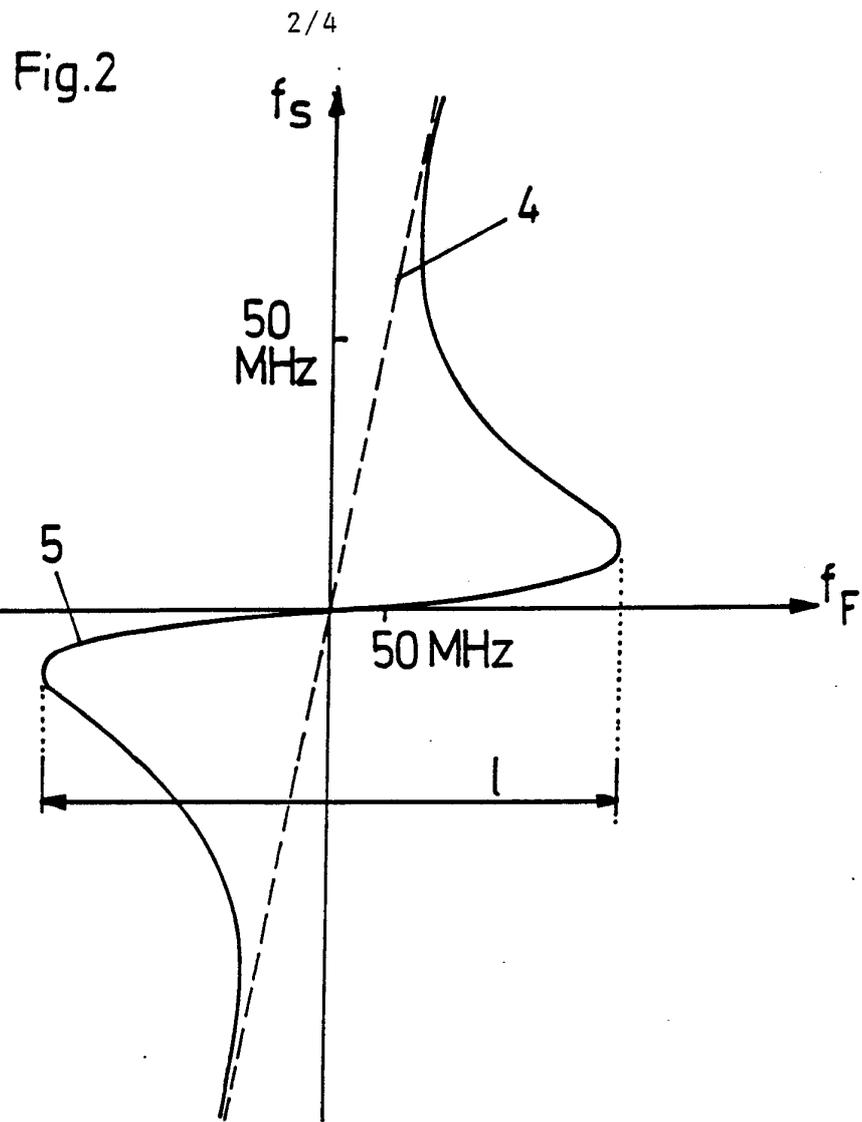
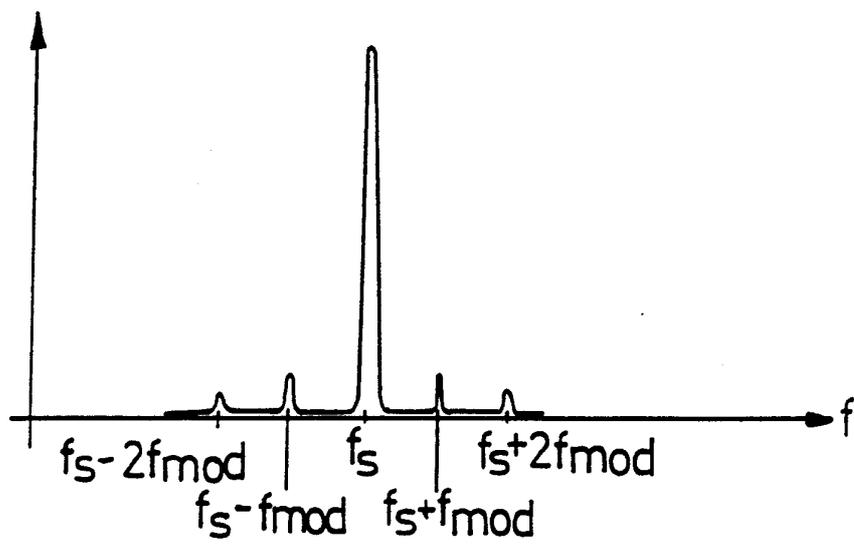


Fig. 3



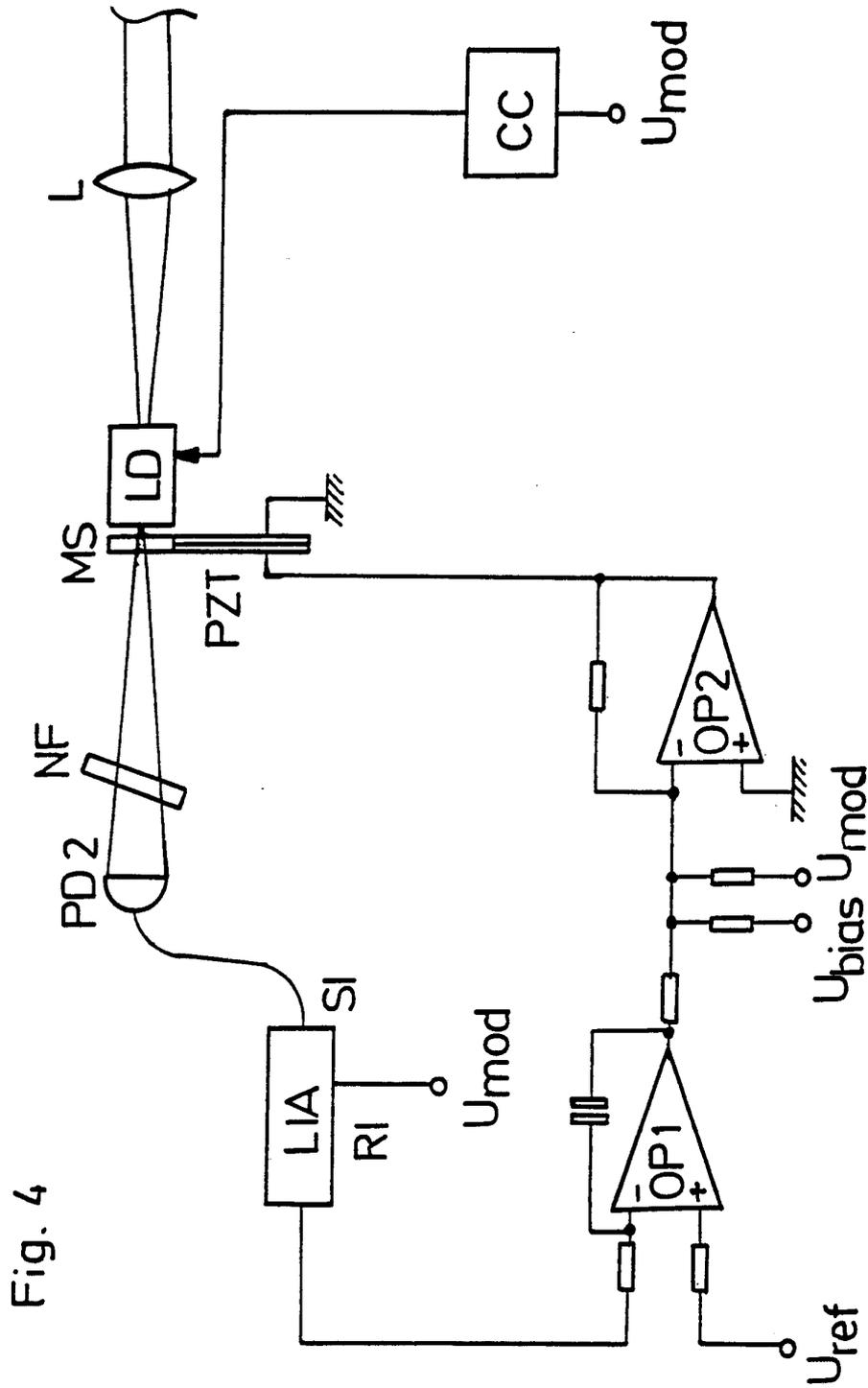


Fig. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No PCT/AT 91/00135

I. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER (If several classification symbols apply, indicate all) ⁶		
According to International Patent Classification (IPC) or to both National Classification and IPC		
Int. Cl. ⁵ H01S3/133; H01S3/139		
II. FIELDS SEARCHED		
Minimum Documentation Searched ⁷		
Classification System	Classification Symbols	
Int. Cl. ⁵	H01S	
Documentation Searched other than Minimum Documentation to the Extent that such Documents are Included in the Fields Searched ⁸		
III. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT ⁹		
Category [*]	Citation of Document, ¹¹ with indication, where appropriate, of the relevant passages ¹²	Relevant to Claim No. ¹³
A	E. DE CLERCQ ET AL. "Design of an optically pumped Cs laboratory frequency standard", Frequency standards and metrology, 1989, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pages 120-124 cited in the application see page 122, paragraph 2 - page 123, paragraph 3; figure 5	1,9,13
A	---	
A	US, A, 4 907 237 (DAHAMANI ET AL.) 6 March 1990 see abstract see column 7, line 46 - line 62 see column 11, line 50 - line 62 see column 12, line 62 - column 13, line 10 see figures 1,13	1,9,13
A	---	
A	JOURNAL OF OPTICAL COMMUNICATIONS. vol. 5, No. 2, June 1984, BERLIN DE pages 46 - 49; O. STROBEL: "Simultaneous wavelength and power stabilization of a GaAlAs semiconductor laser applying a single detector scheme" see page 46, right-hand column, last paragraph - page 47, right-hand column, paragraph 2; figure 3	1
<p>[*] Special categories of cited documents: ¹⁰</p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.</p> <p>"&" document member of the same patent family</p>		
IV. CERTIFICATION		
Date of the Actual Completion of the International Search	Date of Mailing of this International Search Report	
9 April 1992 (09.04.92)	7 May 1992 (07.05.92)	
International Searching Authority	Signature of Authorized Officer	
European Patent Office		

**ANNEX TO THE INTERNATIONAL SEARCH REPORT
ON INTERNATIONAL PATENT APPLICATION NO. AT 9100135
SA 55052**

This annex lists the patent family members relating to the patent documents cited in the above-mentioned international search report. The members are as contained in the European Patent Office EDP file on The European Patent Office is in no way liable for these particulars which are merely given for the purpose of information. 09/04/92

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US-A-4907237	06-03-90	None	

I. KLASSIFIKATION DES ANMELDUNGSGEGENSTANDS (bei mehreren Klassifikationssymbolen sind alle anzugeben) ⁶		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC Int.Kl. 5 H01S3/133; H01S3/139		
II. RECHERCHIERTE SACHGEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff ⁷		
Klassifikationssystem	Klassifikationssymbole	
Int.Kl. 5	H01S	
Recherchierte nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Sachgebiete fallen ⁸		
III. EINSCHLAGIGE VERÖFFENTLICHUNGEN ⁹		
Art. ^o	Kennzeichnung der Veröffentlichung ¹¹ , soweit erforderlich unter Angabe der maßgeblichen Teile ¹²	Betr. Anspruch Nr. ¹³
A	E. DE CLERCQ ET AL. 'Design of an optically pumped Cs laboratory frequency standard', Frequency standards and metrology, 1989, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Seiten 120-124 in der Anmeldung erwähnt siehe Seite 122, Absatz 2 - Seite 123, Absatz 3; Abbildung 5 ---	1, 9, 13
A	US, A, 4 907 237 (DAHAMANI ET AL.) 6. März 1990 siehe Zusammenfassung siehe Spalte 7, Zeile 46 - Zeile 62 siehe Spalte 11, Zeile 50 - Zeile 62 siehe Spalte 12, Zeile 62 - Spalte 13, Zeile 10 siehe Abbildungen 1, 13 ---	1, 9, 13
	-/--	
^o Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen ¹⁰ : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann nahelegend ist "Z" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
IV. BESCHEINIGUNG		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts	
09. APRIL 1992	07.05.92	
Internationale Recherchenbehörde	Unterschrift des bevollmächtigten Bediensteten	
EUROPAISCHES PATENTAMT	BATTIPEDE F. <i>Battipede F.</i>	

III. EINSCHLAGIGE VERÖFFENTLICHUNGEN (Fortsetzung von Blatt 2)		
Art °	Kennzeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der maßgeblichen Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	<p>JOURNAL OF OPTICAL COMMUNICATIONS. Bd. 5, Nr. 2, Juni 1984, BERLIN DE Seiten 46 - 49; O. STROBEL: 'Simultaneous wavelength and power stabilization of a GaAlAs semiconductor laser applying a single detector scheme' siehe Seite 46, rechte Spalte, letzter Absatz - Seite 47, rechte Spalte, Absatz 2; Abbildung 3</p> <p style="text-align: center;">---</p>	1

**ANHANG ZUM INTERNATIONALEN RECHERCHENBERICHT
ÜBER DIE INTERNATIONALE PATENTANMELDUNG NR.**

AT 9100135
SA 55052

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten internationalen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.

Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

09/04/92

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US-A-4907237	06-03-90	Keine	

EPO FORM P0473