

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

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum

8. November 2012 (08.11.2012)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2012/150079 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
G01H 9/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2012/054699

(22) Internationales Anmeldedatum:
16. März 2012 (16.03.2012)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2011 100 252.2 3. Mai 2011 (03.05.2011) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **POLYTEC GMBH** [DE/DE]; Polytec-Platz 1-7, 76337 Waldbronn (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **REMBE, Christian** [DE/DE]; Schlehenweg 33, 76337 Waldbronn (DE). **DRÄBENSTEDT, Alexander** [DE/DE]; Im Wiesele 6, 76275 Ettligen (DE). **SCHÜSSLER, Matthias** [DE/DE]; Dobelweg 6, 76337 Waldbronn (DE). **EHRMANN, Christian** [DE/DE]; Füßlinstraße 6, 76131 Karlsruhe

(DE). **ROTH, Volkmar** [DE/DE]; Breitestraße 100, 76133 Karlsruhe (DE).

(74) Anwälte: **KAISER, Magnus** et al.; Lemcke, Brommer & Partner, Bismarckstraße 16, 76133 Karlsruhe (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR THE OPTICAL NON-CONTACT OSCILLATION MEASUREMENT OF AN OSCILLATING OBJECT

(54) Bezeichnung : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR OPTISCHEN, BERÜHRUNGSLOSEN SCHWINGUNGSMESSUNG EINES SCHWINGENDEN OBJEKTS

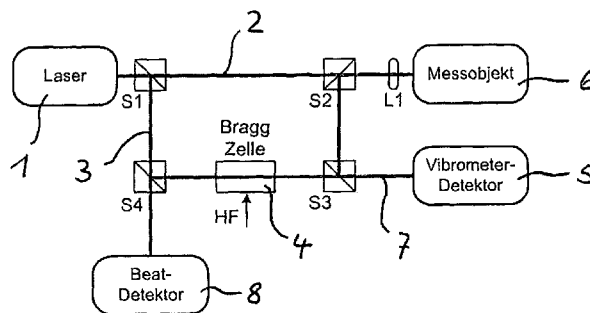


Fig. 1b

Messobjekt...Object to be measured
Bragg Zelle...Bragg line
Vibrometer-Detektor...Vibrometer detector
Beat detector...Beat detector

(57) Abstract: The invention relates to a device for the optical non-contact oscillation measurement of an oscillating object, comprising a laser Doppler vibrometer that has a laser (1) as the light source for a laser beam, a first beam splitter assembly (S1) for splitting the laser beam into a measuring beam (2) and a reference beam (3), a means (4) for shifting the frequency of the reference beam (3) or of the measuring beam (2) in a defined manner, a second beam splitter assembly (S2, S3) by means of which the measuring beam (2) back-scattered by the oscillating object (6) is merged with the reference beam (3) and superimposed on the same, and a detector (5) for receiving the superimposed measuring and reference beam (7) and for generating a measurement signal, wherein the laser (1) is provided with a polarization filter arranged inside the optical resonator of the laser and the frequency of the dominating mode can be kept constant by a control to the beat signal.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2012/150079 A2



CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur optischen, berührungslosen Schwingungsmessung eines schwingenden Objekts, umfassend ein Laser-Doppler-Vibrometer mit einem Laser (1) als Lichtquelle für einen Laserstrahl, mit einer ersten Strahlteileranordnung (S1) zum Aufteilen des Laserstrahls in einen Messstrahl (2) und einen Referenzstrahl (3), mit einem Mittel 4 zur definierten Verschiebung der Frequenz des Referenzstrahls (3) oder des Messstrahls (2), mit einer zweiten Strahlteileranordnung (S2, S3), mittels der der vom schwingenden Objekt (6) rückgestreute Messstrahl (2) mit dem Referenzstrahl (3) zusammengeführt und diesem überlagert wird, sowie mit einem Detektor 5 zum Empfangen des überlagerten Mess- und Referenzstrahls (7) und zum Erzeugen eines Messsignals, wobei der Laser (1) mit einem innerhalb seines optischen Resonators angeordneten Polarisationsfilter versehen ist und die Frequenz der dominierenden Mode durch eine Regelung auf das Beat-Signal konstant gehalten werden kann.

Verfahren und Vorrichtung zur optischen, berührungslosen
Schwingungsmessung eines schwingenden Objekts

5

Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur optischen, berührungslosen Schwingungsmessung eines schwingenden Objekts nach dem Oberbegriff des An-
10 spruchs 1 sowie ein entsprechendes Verfahren nach dem Oberbegriff des An-
spruchs 7.

Ein solches Verfahren verwendet und eine solche Vorrichtung umfasst ein La-
ser-Doppler-Vibrometer mit einem Laser als Lichtquelle für einen Laserstrahl.
15 Dieser wird in einer ersten Strahlteileranordnung in einen Messstrahl und einen
Referenzstrahl aufgeteilt. Entweder der Messstrahl oder der Referenzstrahl er-
fährt eine Frequenzverschiebung, wofür üblicherweise ein akusto-optischer Mo-
dulator, insbesondere eine Bragg-Zelle verwendet wird. Der Messstrahl wird auf
ein zu vermessendes Objekt gerichtet und von dort zurückgestreut oder reflek-
20 tiert. Eine zweite Strahlteileranordnung führt den vom schwingenden Objekt
rückgestreuten Messstrahl mit dem Referenzstrahl zusammen und überlagert
die beiden Strahlen, wodurch sich ein Interferenzsignal ergibt. Die überlagerten
Mess- und Referenzstrahlen werden einem Detektor zugeführt, der aus dem In-
terferenzsignal ein elektrisches Messsignal generiert.

25

Laser-Doppler-Vibrometer können Schwingungen von Objekten, insbesondere
von Objektoberflächen bis in den Megahertzbereich berührungslos messen. Dies
eröffnet Anwendungen beim Messen von Schwingungen von sehr kleinen und
leichten Strukturen, wie in der Mikrosystemtechnik. Jedoch auch Luft- und Fluid-
30 Schwingungen können mit Hilfe eines Laser-Doppler-Vibrometers vermessen
werden. Hierbei wird die Frequenz des Messstrahls durch die Bewegung der zu
vermessenden Objektoberfläche aufgrund des Dopplereffekts bei der Reflexion
moduliert. Da der Laser kohärentes Licht abgibt, ergibt sich durch Überlagern

des durch die Objektbewegung frequenzmodulierten Messstrahls mit dem unverändert gebliebenen Referenzstrahl ein Interferenzsignal, aus dem die Geschwindigkeit des Objekts abgeleitet werden kann. Es wird also die Schwinggeschwindigkeit der Oberfläche des zu vermessenden Objekts erfasst.

5

Da beim vorliegend verwendeten Laser-Doppler-Vibrometer einer der beiden Teile des Laserstrahls in seiner Frequenz verschoben wird und somit ein heterodynes Vibrometer vorliegt, wird eine Modulationsfrequenz des Interferenzsignals erzeugt, die es ermöglicht, nicht nur die momentane Geschwindigkeit der Oberfläche des zu vermessenden Objekts festzustellen, sondern auch das Vorzeichen, also die Bewegungsrichtung, so dass mit dem heterodynen Laser-Doppler-Vibrometer die Schwingungsbewegung des zu vermessenden Objekts eindeutig erfasst werden kann.

15 Die Verschiebung der Frequenz des Referenz- oder des Messstrahls, die, wie erwähnt, typischerweise durch einen akusto-optischen Modulator (Bragg-Zelle) erreicht wird, beträgt nur einen Bruchteil der Frequenz des Laserlichts. Typischerweise wird ein Helium-Neon-Laser (HeNe) verwendet, dessen Frequenz bei $4,74 \times 10^{14}$ Hz liegt. Die Verschiebung der Frequenz des Referenz- oder Messstrahls beträgt typischerweise lediglich 40 MHz. Thermische Einflüsse auf den Laser, und dort insbesondere auf dessen optischen Resonator, führen jedoch zu Veränderungen der Resonatorlänge, die die Frequenz des Laserstrahls um ein Vielfaches der durch die Bragg-Zelle verursachten Frequenzverschiebungen verändern können. Im Falle eines Helium-Neon-Lasers führt eine Erwärmung um nur $0,1^\circ\text{C}$ typischerweise zu einer Verschiebung der Frequenz des Laserstrahls um 300 MHz.

Besondere Probleme bereitet dies, wenn mehrere Laser-Doppler-Vibrometer verwendet werden, die ihre Messstrahlen gleichzeitig auf einen Bereich eines zu vermessenden schwingenden Objekts richten, beispielsweise um dreidimensionale Schwingungen erfassen zu können. Denn wenn sich die Frequenzen der Messstrahlen zu nah sind, kann hier ein Übersprecheffekt eintreten, d.h. der rückgestreute Messstrahl eines Vibrometers der gleichzeitig in ein anderes

30

Vibrometer gelangt kann dort die Messung verfälschen bzw. unmöglich machen. Da die Mittenfrequenz jedes HeNe-Lasers durch ein wohldefiniertes atomares Elektronenniveau bestimmt ist, unterscheiden sich die Mittenfrequenzen mehrerer Laser nicht. Wenn nun die Frequenzen der Messstrahlen solcher mehrerer
5 Vibrometer aufgrund von thermischen Effekten verschoben werden, kommt es immer wieder zufällig zu solchen Übersprecheffekten.

Um den genannten Problemen zu begegnen, ist es bekannt, den im Laser-Doppler-Vibrometer verwendeten Laser in seiner Frequenz zu stabilisieren. Dieser
10 wird hierbei mit einem Regelkreis versehen, der insbesondere auf die Länge des optischen Resonators einwirkt, um temperaturinduzierte Längenänderungen bzw. Frequenzverschiebungen zu kompensieren. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass der Laser nur eine aktive Mode abstrahlt, die zur Messung verwendet wird. Eine bekannte Frequenzstabilisierung besteht darin, bei einem nicht
15 polarisierten Laser ohne Polarisationsvorzugsrichtung und mit zwei aktiven Moden, eine der beiden Moden, die senkrecht zueinander polarisiert sind, über einen Polarisationsstrahlteiler auszukoppeln und als Regelgröße zu verwenden.

Ein solcher frequenzstabilisierter Laser bringt jedoch den Nachteil mit sich, sehr
20 empfindlich auf ungewollte Reflexionen und sonstiges Fremdlicht zu reagieren, das in den optischen Resonator gelangt. Des Weiteren steht bei einem frequenzstabilisierten Laser dessen maximale Laserleistung zur Durchführung einer Messung nicht zur Verfügung. Dies ist insbesondere dann sehr nachteilig, wenn eine Messvorrichtung der vorliegenden Art die von der gewählten Laser-
25 klasse erlaubte abgegebene Lichtleistung ausschöpfen soll, um eine maximale Messgenauigkeit zu erreichen.

-Der genannte Nachteil der reduzierten Leistung eines frequenzstabilisierten Lasers kann zwar vermieden werden, wenn bei einer Vorrichtung und einem
30 Verfahren der vorliegenden Art ein Laser eingesetzt wird, dessen aktive Moden alle zur Messung verwendet werden. Dies erfolgt vorzugsweise so, dass innerhalb des optischen Resonators des Lasers ein Polarisationsfilter eingesetzt wird, der alle aktiven Moden des Lasers auf dieselbe Polarisation bringt, so

dass zum einen die volle Laserleistung für die Messung zur Verfügung steht; zum anderen wird der Laser durch das Polarisationsfilter sehr viel unempfindlicher gegen Rückreflexe und Fremdlicht. Eine Frequenzstabilisierung dieses Lasers entfällt dann allerdings nach bisherigem Kenntnisstand.

5

Ohne Frequenzstabilisierung ergeben sich dann wiederum die Probleme, die eingangs insbesondere im Zusammenhang mit der Verwendung von mehreren Laser-Doppler-Vibrometern beschrieben wurden. Aber auch bei einer Schwingungsmessung mit nur einem Laser-Doppler-Vibrometer, dessen Laser mehr als
10 eine aktive Mode ausgibt, kann die Signalstärke des Interferenzsignals bei bestimmten Werten einer temperaturinduzierten Frequenzverschiebung einbrechen, so dass eine Messung nicht mehr möglich ist. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn zwei aktive Moden ausgekoppelt werden, deren Amplituden etwa gleich sind und die destruktiv interferieren. Schwingungsmessungen können auf
15 diese Weise fehlschlagen, nämlich dann, wenn beispielsweise Temperatureinflüsse aus der Umgebung dazu führen, dass der Laser in einen Modenzustand gerät, in dem eine Messung nicht möglich ist.

Ausgehend von diesem Stand der Technik liegt der vorliegenden Erfindung die
20 Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung und ein Verfahren der eingangs genannten Art vorzuschlagen, mit dem ein Laser eines Laser-Doppler-Vibrometers, insbesondere zur Vermeidung von Übersprecheffekten beim Messen mit zwei oder mehr Laser-Doppler-Vibrometern, hinsichtlich seiner Frequenz stabilisiert und das Laser-Doppler-Vibrometer dennoch mit nahezu maximaler Signalstärke be-
25 trieben werden kann.

Gelöst ist diese Aufgabe durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 1 sowie durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 7. Bevorzugte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Vorrichtung finden sich in
30 den Ansprüchen 2 bis 5; vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens sind in den Ansprüchen 8 bis 13 niedergelegt.

Das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung zeichnen sich also dadurch aus, dass der Laser des Laser-Doppler-Vibrometers mit einem innerhalb seines optischen Resonators angeordneten Polarisationsfilter versehen ist, der die verschiedenen Moden des Lasers gleich polarisiert. Als
5 Polarisationsfilter wird hierbei vorzugsweise mindestens ein Brewster-Fenster verwendet. Durch dieses Polarisationsfilter werden mehrere, meistens zwei Moden des Lasers auf dieselbe Polarisation gebracht, so dass einerseits nicht mehr eine Mode mittels eines Polarisations-Strahlteilers ausgeblendet und als
10 Stellgröße für die Regelung des Lasers verwendet werden kann, andererseits jedoch im Wesentlichen die volle Laserleistung für die Messung zur Verfügung steht. Gleichwohl wird der Laser erfindungsgemäß frequenzstabilisiert, ist also mit einem entsprechenden Regelkreis versehen.

Erfindungsgemäß wurde nämlich erstmals erkannt, dass es für die Frequenzstabilisierung des Lasers im Laser-Doppler-Vibrometer nicht erforderlich ist, einen
15 monomodigen Laser einzusetzen, sondern dass es unschädlich ist, wenn zwei oder mehr aktive Moden gleichzeitig zur Messung verwendet werden. Wichtig ist lediglich, dass eine aktive Mode deutlich stärker als die anderen ist und dass die Frequenz dieser dominierenden Mode auf einen definierten Wert geregelt
20 werden kann.

Wenn der Laser im Zwei-Moden-Betrieb bzw. Drei- oder Mehr-Moden-Betrieb arbeitet, wobei die Polarisationsrichtungen aller Moden im Wesentlichen gleich sind, resultiert eine Schwebungsfrequenz zwischen zwei benachbarten Moden,
25 die sogenannte Beat-Frequenz. Erfindungsgemäß ist erkannt worden, dass das Erfassen dieser Beat-Frequenz ein Regeln der Resonatorlänge des Lasers zur Frequenzstabilisierung ermöglicht. Denn eine Temperaturänderung des Lasers bewirkt einerseits eine Frequenzverschiebung und andererseits eine Änderung der Amplitudenverteilung der verschiedenen aktiven Moden. Bei einer Temperaturänderung des Lasers wandern dessen aktive Moden durch das Verstärkungs-
30 profil des Lasers, so dass die aktiven Moden bis auf eine Ausnahme im Durchlauf jeweils unterschiedliche Intensitäten besitzen. Dies führt beim Durchlauf der aktiven Moden durch das Verstärkungsprofil zu einem quasi-periodischen Ver-

lauf des Beat-Signals, abhängig von der Resonatorlänge des Lasers, welche in der Regel linear abhängig von der Temperatur des Resonators ist.

Erfindungsgemäß ist weiter erkannt worden, dass dieser quasi-periodische Verlauf des Beat-Signals dazu geeignet ist, als Regelgröße für die Regelung der Resonatorlänge des Lasers und damit zur Regelung der Laserfrequenz verwendet zu werden. Insbesondere dann, wenn die Resonatorlänge des Lasers über die Temperatur, d.h. durch bedarfsweises Heizen und/oder Kühlen geregelt wird, kann der erfindungsgemäß festgestellte direkte Zusammenhang zwischen den Schwankungen in der Intensität des Beat-Signals und der Temperatur des optischen Resonators zur Regelung genutzt werden und zwar zweckmäßigerweise an einem Punkt, an dem die Intensität des Beat-Signals über der Temperatur eine ausreichend steile Flanke aufweist. Dies ist innerhalb eines Modendurchlaufs durch das Verstärkungsprofil des Lasers in mindestens zwei Bereichen der Fall.

Die Auswertung des Beat-Signals, das als elektrisches Schwebungssignal erfasst wird, wird erfindungsgemäß zur Stabilisierung der Laserfrequenz verwendet. Wenn man die Leistung oder die Frequenz oder eine kombinierte Messgröße aus Leistung und Frequenz des elektrischen Schwebungssignals zur Regelung bzw. Stabilisierung der Laserfrequenz verwendet, erzielt man ein definiertes Leistungsverhältnis der Lasermoden, die die Schwebung bzw. das Beat-Signal hervorrufen. Dieses Leistungsverhältnis kann im Rahmen der Erfindung gegebenenfalls auch Null sein, und zwar dann, wenn der Laser zufällig einmodig läuft.

Mit der vorliegenden Erfindung kann also ein mehrmodiger Laser verwendet und dieser gleichwohl frequenzstabilisiert werden, und zwar insbesondere bei einer Frequenz, bei der zwei oder mehr aktive Moden unterschiedliche Intensitäten aufweisen, so dass die Regelung in einem stabilen Betriebszustand bleibt. Zufällige Temperaturänderungen im Betrieb durch Aufwärmeeffekte und Umwelteinflüsse werden durch die erfindungsgemäße Frequenzregelung kompensiert, so dass die erfindungsgemäße Vorrichtung über lange Zeiträume automatisiert

Schwingungen messen kann, ohne Gefahr zu laufen, während der Messung in einen Zustand zu geraten, in dem das Signal-Rausch-Verhältnis zu ungünstig für ein verlässliches Messergebnis ist.

5 Insbesondere bei einer Schwingungsmessung eines Objekts durch mehrere Laser-Doppler-Vibrometer kann es auch bei länger andauernden automatischen Messvorgängen nicht mehr zu zufälligen Übersprecheffekten kommen, weil etwa die verwendeten Laser durch Umwelteinflüsse und Aufwärmeeffekte unterschiedliche Temperaturänderungen und damit Frequenzverschiebungen zueinander
10 erleiden. Gleichwohl können die Laser der Vibrometer so betrieben werden, dass nicht zwei gleich starke Moden entstehen, wodurch die Signalstärke einbrechen würde.

Darüber hinaus sind die erfindungsgemäß ausgestalteten Laser aufgrund des
15 eingesetzten Polarisationsfilters sehr unempfindlich gegen ungewollte Reflexionen und sonstiges Fremdlicht, das in den Resonator gelangt.

Die erfindungsgemäße Verwendung von frequenzstabilisierten Lasern mit Polarisationsfiltern kann schließlich vorzugsweise dazu genutzt werden, eine Mess-
20 vorrichtung mit mehreren Laser-Doppler-Vibrometern, die gleichzeitig im Rahmen der Fokussiergenauigkeit auf denselben Punkt des schwingenden Objekts gerichtet sind, so zu betreiben, dass Übersprecheffekte vermieden werden. Hierzu kann die erfindungsgemäß vorhandene Frequenzregelung der Laser zu einer bedarfsweisen gezielten Frequenzverschiebung eines oder mehrerer Laser
25 der verwendeten Laser-Doppler-Vibrometer genutzt werden, um Frequenzabstände einhalten zu können, mit denen es bei bestimmten Demodulationsbandbreiten keinen oder nur wenig Übersprecheffekt gibt und gleichzeitig der zwangsläufige Signaleinbruch nicht zu hoch wird. Hierzu werden die Laserfrequenzen so geregelt, dass die Frequenzen mindestens um 2 x Demodulations-
30 bandbreite auseinanderliegen.

Ein Ausführungsbeispiel für die vorliegende Erfindung wird im Folgenden anhand der beigefügten Zeichnungen näher beschrieben und erläutert. Es zeigen:

- 5
Figur 1 zwei alternative Blockschaltbilder (Figuren 1a und 1b) eines heterodyn-
dynen Laser-Doppler-Vibrometers zur Verwendung in einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;
- 10
Figur 2 ein Prinzipschaubild des Verstärkungsprofils eines beispielhaft
verwendeten Helium-Neon-Lasers;
- Figur 3 vier Prinzipschaubilder wie Figur 2, darstellend die Betriebszustände
des Helium-Neon-Lasers bei vier verschiedenen Temperaturen;
- 15
Figur 4 ein Prinzipschaubild der Frequenzabweichung der dominanten Mode
von der Mittenfrequenz des Helium-Neon-Lasers, abhängig von der
Temperatur des Resonators, die Bezeichnungen (A), (B), (C), (D) be-
ziehen sich auf die in Fig. 3 dargestellten Modenzustände;
- 20
Figur 5 ein Prinzipschaubild, in dem die Intensität des Beat-Signals über der
Temperaturänderung für den Ein- bzw. Zwei-Moden-Betrieb des Heli-
um-Neon-Lasers aus den Figuren 2 bis 4 dargestellt ist, die Bezeich-
nungen (A), (B), (C), (D) beziehen sich auf die in Fig. 3 dargestellten
Modenzustände;
- 25
Figur 6 ein Prinzipschaubild, in dem die Intensität des Beat-Signals über der
Temperaturänderung für den Zwei- bzw. Drei-Moden-Betrieb des He-
lium-Neon-Lasers aus den Figuren 2 bis 4 dargestellt ist, die Be-
zeichnungen (A), (B), (C), (D) beziehen sich auf die in Fig. 3 darge-
stellten Modenzustände;

30

Als Ausführungsbeispiel für eine erfindungsgemäße Vorrichtung wird hier eine Vorrichtung mit einem Laser-Doppler-Vibrometer beschrieben, das prinzipiell wie in Figur 1a dargestellt aufgebaut ist. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel

wird ein Helium-Neon-Laser 1 mit einer Resonatorlänge von 20,4 cm verwendet, dessen kohärentes Licht über einen ersten Strahlteiler S1 in einen Messstrahl 2 und einen Referenzstrahl 3 aufgeteilt wird. Der Referenzstrahl 3 wird über einen Spiegel Sp1 durch eine Bragg-Zelle 4, die hier als akusto-optischer Frequenzschieber dient, geleitet und gelangt durch einen weiteren Strahlteiler S3 auf einen optischen Detektor 5. Die Bragg-Zelle 4 verschiebt hierbei das Referenzsignal 3 in seiner Frequenz um einen Frequenzoffset von typischerweise 40 MHz.

Der Messstrahl 2 wird über einen zweiten Strahlteiler S2 und eine Lambda/4-Platte L1 auf ein schwingendes Messobjekt 6 geleitet. Die Oberfläche des Messobjekts 6 streut den Messstrahl 2 zurück. Der rückgestreute Messstrahl wird im zweiten (Polarisations-)Strahlteiler S2 auf den dritten Strahlteiler S3 reflektiert und dort mit dem Referenzstrahl 3 überlagert. Die überlagerten, zeitlich kohärenten Mess- und Referenzstrahlen bilden ein Interferenzsignal 7, dessen Intensität vom optischen Detektor 5 empfangen wird. Die Lambda/4-Platte L1 kann in einer anderen Bauvariante weggelassen werden, so dass als S2 ein normaler Strahlteiler verwendet werden kann.

Wegen des Dopplereffektes wird das am schwingenden Messobjekt 6 reflektierte Licht des Messstrahls 2 entsprechend der momentanen Geschwindigkeit der Messobjektoberfläche frequenzverschoben. Diese Frequenzverschiebung ist direkt proportional zur Geschwindigkeit der abgetasteten Objektoberfläche. Da der so frequenzverschobene Messstrahl 2 nicht mit einem unverändert gebliebenen Referenzstrahl 3 überlagert wird, sondern mit dem Messstrahl 3, der mittels der Bragg-Zelle 4 mit einem Frequenzoffset versehen worden ist, kann man aus dem Signal des Detektors 5 nicht nur die momentane Schwingungsgeschwindigkeit der Messobjektoberfläche bestimmen, sondern auch deren Vorzeichen. Die Schwingungsbewegung ist damit eindeutig erfasst.

Wenn man in einer erfindungsgemäßen Vorrichtung beispielsweise drei solcher Laser-Doppler-Vibrometer einsetzt, kann ein Messobjekt 6 bzw. die Schwingung von dessen Oberfläche dreidimensional erfasst werden.

Das Laserlicht des im vorliegenden Ausführungsbeispiel eingesetzten Helium-Neon-Lasers mit einer Wellenlänge von 632,8 nm und einer Resonatorlänge von 204 mm weist eine mittlere Laserfrequenz von 474 THz auf. Diese Lichtquelle ist ein Multi-Moden-Laser, in dem sich, abhängig vom Laserzustand, eine oder maximal drei aktive Lasermoden ausbilden. Je nach Intensität der Moden und deren genauen Lage im Frequenzband wird das Laserlicht in seiner Intensität und Frequenz stark beeinflusst.

Die Lasermoden (aktive wie passive) nehmen einen Modenabstand $\Delta\nu$ zueinander ein, der abhängig von der Resonatorlänge ist. Dieser feste Modenabstand $\Delta\nu$ beträgt beim im vorliegenden Ausführungsbeispiel eingesetzten Helium-Neon-Laser etwa 735 MHz.

Eine Selektion von aktiven Moden wird durch das Verstärkungsprofil des Helium-Neon-Lasers vorgenommen, was Figur 2 visualisiert:

In Figur 2 ist das Verstärkungsprofil des im Ausführungsbeispiel verwendeten Helium-Neon-Lasers über der Frequenz aufgetragen. Zu erkennen sind vier Lasermoden im Abstand von jeweils 735 MHz, von denen sich zwei innerhalb des Verstärkungsprofils und oberhalb der Laserschwelle befinden, und die deshalb aktive Moden sind. Diese beiden aktiven Moden stehen nicht symmetrisch bezüglich des Verstärkungsprofils, so dass die höherfrequente Mode hier dominant ist. Die beiden Moden außerhalb des Verstärkungsprofils schwingen nicht an und werden als passive Moden bezeichnet.

Bei einer Temperaturänderung des Laser-Resonators „wandern“ die Moden durch das Verstärkungsprofil. Bei einer Temperaturerhöhung und damit einer Verlängerung des Resonators bewegen sich die Moden im Schaubild nach Figur 2 von rechts nach links und bei einer Temperaturverringerng von links nach rechts. Eine Temperaturänderung bewirkt einerseits eine Frequenzverschiebung, andererseits eine Änderung der Amplitudenverteilung der aktiven Moden. Bei einer kontinuierlichen Temperaturveränderung verschwindet jeweils eine

aktive Mode auf einer Seite des Verstärkungsprofils und auf der anderen Seite des Verstärkungsprofils taucht eine neue aktive Mode auf.

Die Frequenzabweichung der dominanten Mode von der Mittenfrequenz des Lasers kann mehrere hundert MHz betragen. Dies übertrifft den Frequenzoffset, der im Laser-Doppler-Vibrometer durch die Bragg-Zelle erzeugt wird, um ein Vielfaches.

Figur 4 zeigt die Frequenzabweichung der dominanten Mode von der Mittenfrequenz. Der Frequenzsprung (D) entsteht an der Stelle, an der zwei gleich starke Moden vorliegen, an dieser Stelle wechselt die dominante Mode. Dies visualisieren die Figuren 3 und 4, wobei in Figur 3 das Verstärkungsprofil des Lasers und seine Moden in einer der Figur 2 entsprechenden Darstellung in vier unterschiedlichen Betriebszuständen (A), (B), (C), (D) dargestellt ist. Die aus diesen Betriebszuständen resultierende Frequenzabweichung der dominanten Mode ist in Figur 4 dargestellt, wobei die Betriebszustände (A...) in die über der Temperatur aufgetragene Frequenzkurve eingetragen sind. Gut zu erkennen ist, dass im Betriebszustand (B) ein symmetrischer Drei-Moden-Betrieb vorliegt, bei dem die Frequenz der dominanten Mode mit der Mittenfrequenz übereinstimmt. Eine Abkühlung des Lasers führt zu einer Modenverschiebung in Richtung des Betriebszustands (A), während eine Erwärmung des Lasers eine Modenverschiebung in Richtung des Betriebszustands (C) verursacht. Aus Figur 4 lässt sich die daraus resultierenden Verschiebungen der Frequenz der dominanten Mode ablesen.

Jede Mode kann als Sinusschwingung mit einer Modenamplitude, einer Modenfrequenz und einer Modenphase beschrieben werden. Sind zwei bzw. drei Moden gleichzeitig aktiv, bilden sich zwei bzw. drei Sinusschwingungen mit unterschiedlicher Frequenz (im Modenabstand) gleichzeitig im Resonator aus. Wenn das Licht des Lasers beispielsweise mit einer Fotodiode gemessen wird, so kann das Überlagerungssignal bei der Differenzfrequenz 735 MHz der Sinusschwingungen gemessen werden. Das Überlagerungssignal bei der Differenzfrequenz wird als Beat-Signal bezeichnet.

In Figur 5 ist die Intensität des Beat-Signals für den Ein- bzw. Zwei-Moden-Betrieb über der Temperaturänderung des Laserresonators aufgetragen. Auch hier sind die Modenzustände (A), (B), (C) und (D) aus Figur 3 eingetragen. In den Punkten (A), (C) und (D) sind jeweils zwei aktive Moden vorhanden, die durch ihre Mischprodukte das Beat-Signal bilden. Der Signaleinbruch im Punkt (B) beruht darauf, dass nur eine aktive Mode vorhanden ist, so dass keine Mischung der Signale durchgeführt werden kann und das Beat-Signal gleich Null ist.

Figur 6 zeigt die Intensität des Beat-Signals für zwei bzw. drei aktive Moden, wiederum über der Temperaturänderung des Resonators aufgetragen. Die Punkte (A), (C) und (D) entsprechen dem Zustand des Verstärkungsprofils, in dem zwei aktive Moden vorhanden sind. Im Einbruch des Beat-Signals, am Punkt (B), sind gleichzeitig drei aktive Lasermoden vorhanden. Der Laser besitzt also immer mindestens zwei aktive Moden, die bei 735 MHz ein Beat-Signal erzeugen, daher verschwindet hier im Gegensatz zum Beispiel aus Figur 5 das Beat-Signal nicht komplett. Der Beat-Signal Einbruch am Punkt (B) ist jedoch nach wie vor vorhanden.

Wie anhand der Figuren 5 und 6 deutlich wird, besitzt das Beat-Signal abhängig von der Temperatur an ausgewählten Betriebszuständen Flanken, die als Stellgröße für die Regelung der Laserfrequenz geeignet sind. Über die fallende und steigende Flanke kann das Beat-Signal eindeutig der Frequenz der dominanten Mode zugeordnet werden.

In Figur 1b ist ein zur Figur 1a alternativer Aufbau eines im Rahmen der Erfindung verwendbaren Laser-Doppler-Vibrometers dargestellt, wobei hier zwei Detektoren vorhanden sind: Ein Vibrometer-Detektor, der mit dem optischen Detektor 5 aus Figur 1a übereinstimmt, hier jedoch nur das Interferenzsignal des Vibrometers detektieren soll, sowie ein separater Beat-Detektor 8, der das Beat-Signal aufnimmt. Für den Beat-Detektor wird in einem vierten Strahlteiler S4, der anstelle des Spiegels Sp1 in den Strahlengang gesetzt ist, ein entsprechen-

des Signal ausgekoppelt. Im Aufbau nach Figur 1a detektiert hingegen der optische Detektor gleichzeitig das Interferenzsignal und das Beat-Signal. Die Ausführung in Fig. 1a geht davon aus, dass deutlich mehr Referenzlicht als vom Messobjekt zurückgestreutes Licht auf den Detektor fällt, was in der Regel der Fall ist, damit ist das Beat-Signal in guter Näherung nur vom Referenzlicht abhängig.

Für die Anwendung im Laser-Doppler-Vibrometer in einer erfindungsgemäßen Vorrichtung bzw. in einem erfindungsgemäßen Verfahren ist es vorteilhaft, den Laser auf eine Frequenz zu regeln, bei dem eine Mode dominant ist. Die Regelung der Lasertemperatur, und damit der Resonatorlänge, kann mittels einer geregelten Laserheizung vorgenommen werden. Die Regelung dieser Laserheizung kann durch Auswertung der Beat-Amplitude und/oder der Beat-Frequenz des Lasers erfolgen.

Alternativ zu einer geregelten Laserheizung kann beispielsweise ein Laser-Netzteil mit einstellbarem Laserstrom verwendet werden; der Laserstrom hat Einfluss auf die Temperatur des Resonators.

Es ist jedoch auch möglich, die Resonatorlänge auf andere Weise zu regeln, beispielsweise durch Temperaturplättchen oder Piezokristalle, die die Position der Resonatorspiegel gezielt verändern können.

Mit der vorliegenden Erfindung ist es insbesondere möglich, Vorrichtungen und Verfahren zur optischen, berührungslosen Schwingungsmessung mit mehr als einem Laser-Doppler-Vibrometer zur zwei- oder dreidimensionalen Vermessung eines Objekts über längere Zeit automatisiert zu betreiben, ohne Gefahr zu laufen, dass mittels Temperatureinflüssen durch die Umgebung oder durch Positionsveränderungen der Laser-Doppler-Vibrometer Laserfrequenz-Verschiebungen auftreten, die zu Übersprecheffekten führen können, wodurch die Messungen unbrauchbar würden.

Ansprüche

1. Vorrichtung zur optischen, berührungslosen Schwingungsmessung eines schwingenden Objekts, umfassend ein Laser-Doppler-Vibrometer mit einem Laser (1) als Lichtquelle für einen Laserstrahl, mit einer ersten Strahlteileranordnung (S1) zum Aufteilen des Laserstrahls in einen Messstrahl (2) und einen Referenzstrahl (3), mit einem Mittel (4) zur definierten Verschiebung der Frequenz des Referenzstrahls (3) oder des Messstrahls (2), mit einer zweiten Strahlteileranordnung (S2, S3), mittels der der vom schwingenden Objekt (6) rückgestreute Messstrahl (2) mit dem Referenzstrahl (3) zusammengeführt und diesem überlagert wird, sowie mit einem Detektor (5) zum Empfangen des überlagerten Mess- und Referenzstrahls (7) und zum Erzeugen eines Messsignals, dadurch gekennzeichnet, dass der Laser (1) mit einem innerhalb seines optischen Resonators angeordneten Polarisationsfilter und mit einem Regelkreis zur Frequenzstabilisierung versehen ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Regelkreis so ausgebildet ist, dass er auf ein Beat-Signal des Lasers (1) regelt.
3. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Polarisationsfilter aus mindestens einem Brewster-Fenster gebildet ist.
4. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Regelkreis einen Detektor zum Erfassen des Beat-Signals des Lasers und/oder zum Umwandeln des Beat-Signals in ein elektrisches Schwebungssignal umfasst, und dass der Regelkreis so ausgebildet ist, dass er die Leistung und/oder die Frequenz des elektrischen Schwebungssignals regelt.

5. Vorrichtung mindestens nach einem der Ansprüche 1 bis 4,
dadurch gekennzeichnet, dass der Regelkreis ein Mittel zum gezielten
Verändern der Temperatur des optischen Resonators oder eines Teils des
optischen Resonators des Lasers (1) umfasst, um die Resonatorlänge zu
beeinflussen.
6. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei Laser-Doppler-Vibrometer
gleichzeitig auf einen zu vermessenden Bereich des schwingenden Objekts
gerichtet sind, und dass mindestens eines der Laser-Doppler-Vibrometer
so ausgebildet ist, dass die Frequenz seines Messstrahls (2) verschoben
werden kann, um einem Übersprecheffekt entgegenzuwirken
7. Verfahren zur optischen, berührungslosen Schwingungsmessung eines
schwingenden Objekts mit mindestens einem Laser-Doppler-Vibrometer,
umfassend einen Laser (1) als Lichtquelle für einen Laserstrahl, eine erste
Strahlteileranordnung (S1) zum Aufteilen des Laserstrahls in einen Mess-
strahl (2) und einen Referenzstrahl (3), ein Mittel (4) zur definierten Ver-
schiebung der Frequenz des Referenzstrahls (3) oder des Messstrahls (2),
eine zweite Strahlteileranordnung (S1), mittels der der vom schwingenden
Objekt (6) rückgestreute Messstrahl (2) mit dem Referenzstrahl (3) zu-
sammengeführt und diesem überlagert wird, sowie einen Detektor (5) zum
Empfangen des überlagerten Mess- und Referenzstrahls (7) und zum Er-
zeugen eines Messsignals,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Moden des Lasers (1) mittels eines innerhalb seines optischen
Resonators angeordneten Polarisationsfilters gleich polarisiert werden, und
dass der Laser (1) frequenzstabilisiert wird, indem auf ein Beat-Signal des
Lasers geregelt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7,
dadurch gekennzeichnet, dass das Beat-Signal mit einem Detektor erfasst
und/oder in ein elektrisches Schwebungssignal umgewandelt wird, und
dass der Laser durch Regeln der Leistung und/oder der Frequenz des
5 elektrischen Schwebungssignals frequenzstabilisiert wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 oder 8,
dadurch gekennzeichnet, dass der Laser (1) auf Basis einer Beat-Signal-
Erfassung, insbesondere auf Basis einer Auswertung der Beat-Signal-
10 Amplitude, der Beat-Signal-Frequenz und/oder der Beat-Signal-Änderung
frequenzstabilisiert wird.
10. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 9,
dadurch gekennzeichnet, dass zur Frequenzstabilisierung die Temperatur
15 des optischen Resonators des Lasers (1) gezielt verändert wird, um die
Resonatorlänge zu beeinflussen.
11. Verfahren nach Anspruch 10,
dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur des optischen Resonators
20 durch Regeln einer Laserheizung und/oder mittels eines geregelten Laser-
netzteils mit einstellbarem Laserstrom verändert wird.
12. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 7 bis 11,
dadurch gekennzeichnet, dass zur Frequenzstabilisierung der Abstand
25 zwischen den Spiegeln des optischen Resonators des Lasers mittels eines
Aktuators, insbesondere eines Piezoaktors, verändert wird.
13. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 7 bis 12,
dadurch gekennzeichnet,
30 dass mindestens zwei Laser-Doppler-Vibrometer gleichzeitig auf einen zu
vermessenden Bereich des schwingenden Objekts (6) gerichtet werden,
und dass die Frequenz des Messstrahls (2) mindestens eines der Laser-
Doppler-Vibrometer bei Vorliegen eines Übersprecheffekts verschoben
wird, um diesem Übersprecheffekt entgegenzuwirken.

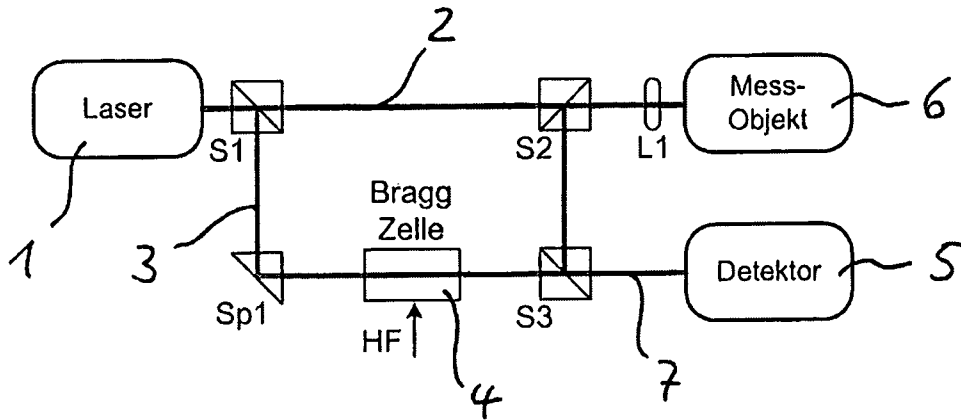


Fig. 1a

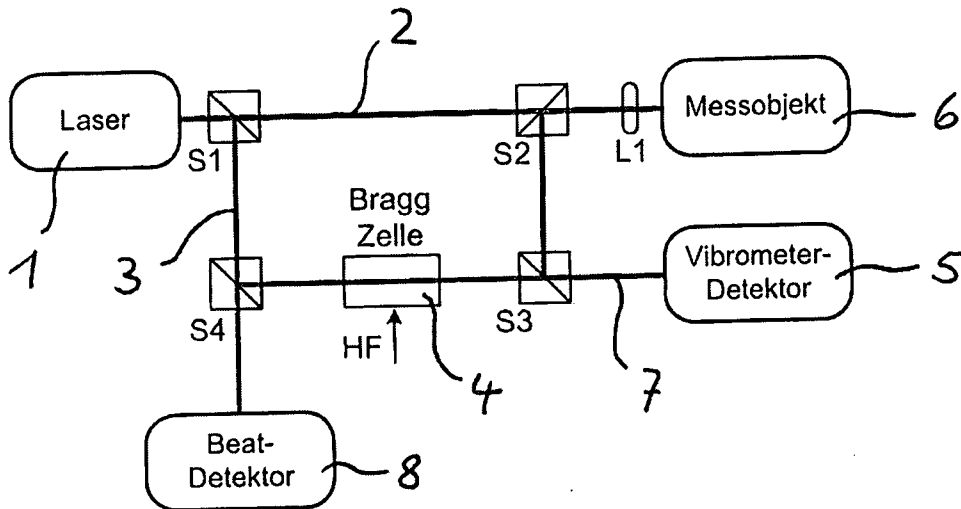


Fig. 1b

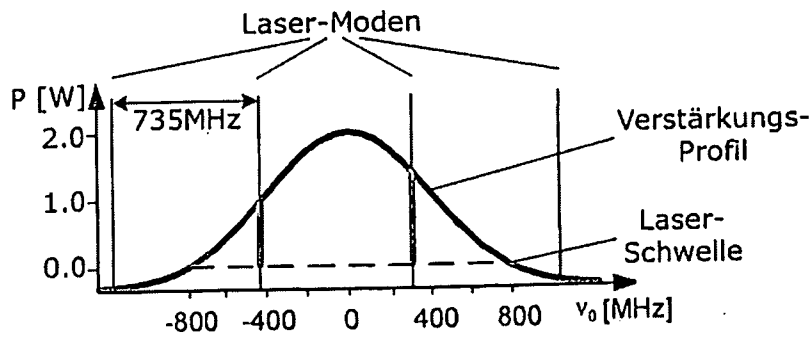


Fig. 2

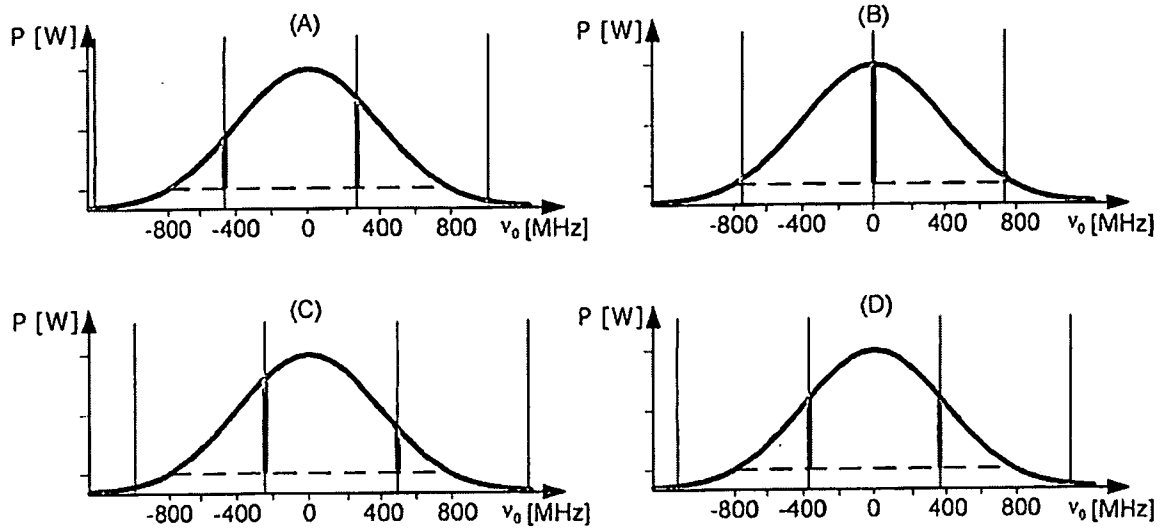


Fig. 3

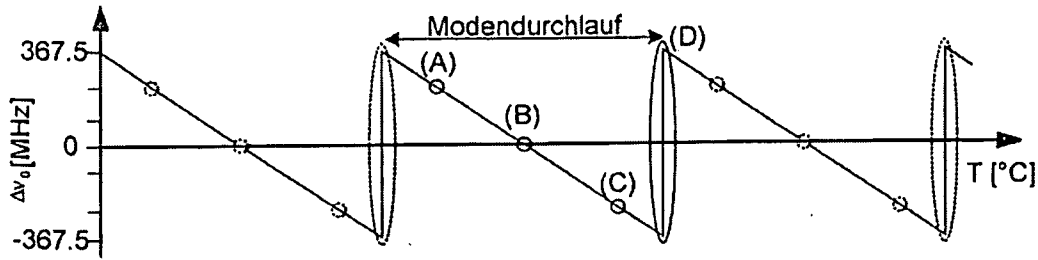


Fig. 4

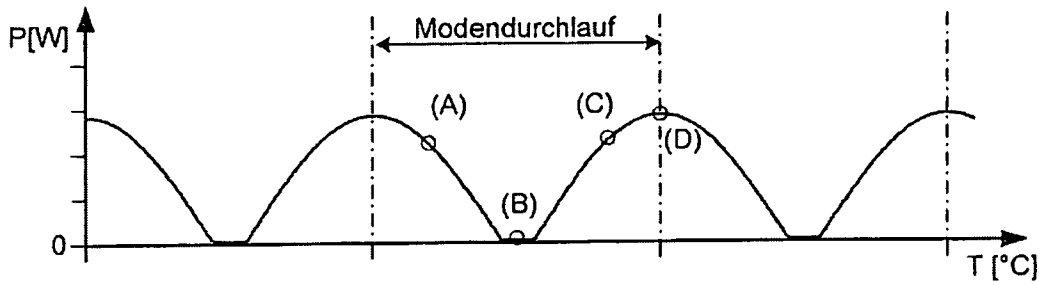


Fig. 5

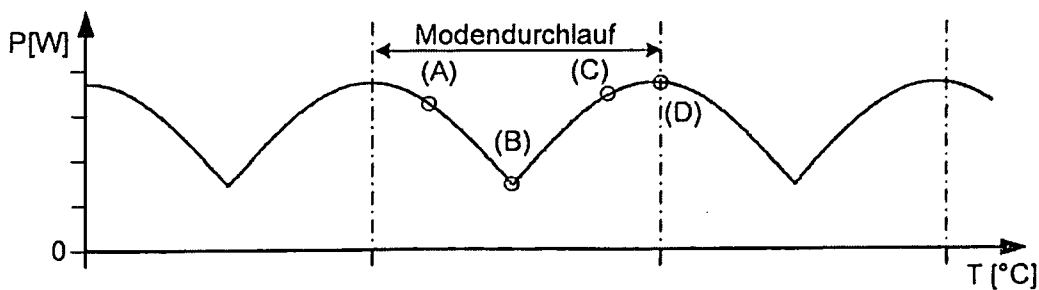


Fig. 6