



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2021 113 766.7**  
(22) Anmeldetag: **27.05.2021**  
(43) Offenlegungstag: **01.12.2022**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **23.03.2023**

(51) Int Cl.: **G01S 17/32 (2020.01)**  
**G01S 17/58 (2006.01)**  
**G01S 17/66 (2006.01)**

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

(73) Patentinhaber:  
**Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, dieses vertreten durch den Präsidenten der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, DE; Humboldt-Universität zu Berlin, 10099 Berlin, DE**

(72) Erfinder:  
**Schell, Andreas, Prof. Dr., 30451 Hannover, DE; Schkolnik, Vladimir, Dr., 10247 Berlin, DE**

(74) Vertreter:  
**Gramm, Lins & Partner Patent- und Rechtsanwälte PartGmbH, 38122 Braunschweig, DE**

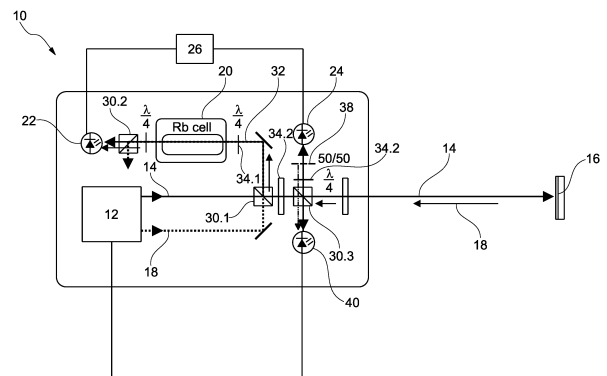
(56) Ermittelte Stand der Technik:

US	6 646 723	B1
US	2012 / 0 106 579	A1
US	2020 / 0 150 251	A1

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Messung der Geschwindigkeit eines Zielobjekts mittels LIDAR und LIDAR-System**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Messung der Geschwindigkeit ( $v$ ) eines Zielobjekts (16) mittels LIDAR, mit den Schritten:

- Erzeugen eines Mess-Laserstrahls (14) mit zumindest einer Mess-Frequenz ( $f_{14}$ ),
- Senden des Mess-Laserstrahls (14) zum Zielobjekt (16),
- Erfassen von Rück-Laserlicht (18), das vom Zielobjekt (16) reflektiert wurde,
- Erfassen einer Signal-Phasenlage ( $\varphi_{\text{signal}}$ ) des Rück-Laserlichts (18) hinter einer Dispersionszelle (20), wobei die Dispersionszelle (20) eine Phasenverschiebung des Rück-Laserlichts (18) in Abhängigkeit von dessen Rück-laserlicht-Frequenz ( $f_{18}$ ) bewirkt,
- Erfassen einer Referenz-Phase ( $\varphi_{\text{ref}}$ ) des Rück-Laserlichts (18) mittels einer Referenz-Fotodiode (24) vor der Dispersionszelle (20), und
- Bestimmen der Geschwindigkeit ( $v$ ) aus der Referenz-Phase ( $\varphi_{\text{ref}}$ ) und der Signal-Phasenlage ( $\varphi_{\text{signal}}$ ).



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Messung der Geschwindigkeit eines Zielobjekts mittels LIDAR. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein LIDAR-System mit (a) einer Laserquelle zum Erzeugen eines Mess-Laserstrahls mit zumindest einer Mess-Frequenz, wobei (b) das LIDAR-System ausgebildet ist zum Senden des Mess-Laserstrahls zu einem Zielobjekt, und wobei (c) das LIDAR-System ausgebildet ist zum Erfassen von Rück-Laserlicht, das vom Zielobjekt reflektiert wurde.

**[0002]** Bei einer Geschwindigkeitsmessung mittels LIDAR wird Licht auf das Zielobjekt ausgesendet und das reflektierte Licht erfasst. Bewegt sich das Zielobjekt relativ zur Laserquelle, so kommt es zu einer Frequenzverschiebung gemäß dem Dopplereffekt. Aus der Frequenzverschiebung kann auf die Relativgeschwindigkeit geschlossen werden.

**[0003]** Nachteilig an bekannten LIDAR-Systemen ist, dass kleine Geschwindigkeiten nicht oder nur mit einer hohen Messunsicherheit gemessen werden können.

**[0004]** Aus der US 6 646 723 B1 ist ein Interferometer zum Abstandsmessen bekannt, das Hochgeschwindigkeits-Phasenmodulatoren und zusätzliche Phasenmesser umfasst, um mehrere Überlagerungssignalaare mit unterschiedlichen Frequenzen zu erzeugen und zu analysieren. Die elektrooptischen Hochgeschwindigkeits-Phasenmodulatoren erzeugen Modulationsseitenbänder mit großem Frequenzabstand und benötigen nur eine einzige frequenzstabile Laserquelle, so dass ein erster Laser nicht auf einen zweiten Laser des Interferometers abgestimmt oder stabilisiert werden muss. Die Kombination der von den modulierten Seitenbändern erzeugten Signale wird getrennt und verarbeitet, um den Zielabstand zu ermitteln.

**[0005]** Das daraus resultierende Messgerät ermöglicht einen Sensor mit Submikrometergenauigkeit oder besser über einen Mehrkilometerbereich.

**[0006]** Die US 2012/0 106 579 A1 beschreibt eine abstimmbare Laserquelle, die eine vorgegebene frequenzmodulierte optische Wellenform mit einer Genauigkeit von 0,01 Prozent über eine Bandbreite von mehr als etwa 50 Gigahertz erzeugt. Ein abstimmbarer Laser gibt dazu Licht einer vorgegebenen optischen Frequenz in optische Pfade ab. Mehrere optische Pfade sind so konfiguriert, dass sie das von dem Laser ausgegebene Licht auf einen optischen Detektor leiten. Mittels einer Steuerung wird eine gemessene Differenz in der optischen Dispersion zwischen den mehreren optischen Pfaden und einem vom optischen Detektor ausgegebenen

Detektorsignal zum Regeln der Frequenz des Laserlichts verwendet.

**[0007]** Die US 2020/0 150 251 A1 beschreibt ein LIDAR-Verfahren für autonome Fahrzeuge, bei dem ein optisches Signal eines Lasers moduliert wird und das modulierte optische Signal in Richtung eines Objekts gesendet wird. Das zurückreflektierte optische Signal wird empfangen und mit einem optischen Referenzsignal gemischt, um ein elektrisches Signal zu erzeugen. Aus dem elektrischen Signal und dem modulierten optischen Signal wird ein Parameter bestimmt, anhand dessen auf eine interne Reflexion des zurückreflektierten optischen Signals an einer optischen Komponenten geschlossen werden kann. So werden starke Reflexionssignale unterdrückt, die schwache Signale maskieren können. Auf diese Weise wird ein Fehler bei der Dopplergeschwindigkeitsmessung vermindert.

**[0008]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein LIDAR-System vorzuschlagen, das kleine Geschwindigkeiten des Zielobjekts mit geringerer Messunsicherheit messen kann.

**[0009]** Die Erfindung löst das Problem durch ein Verfahren zur Messung der Geschwindigkeit eines Zielobjekts mittels LIDAR, mit den Schritten: (a) Erzeugen eines Mess-Laserstrahls mit zumindest einer Mess-Frequenz  $f_{14}$ , (b) Senden des Mess-Laserstrahls zum Zielobjekt, (c) Erfassen von Rück-Laserlicht, das vom Zielobjekt reflektiert wurde, (d) Erfassen einer Signal-Phasenlage  $\varphi_{\text{signal}}$  des Rück-Laserlichts hinter einer Dispersionszelle, wobei die Dispersionszelle eine Phasenverschiebung des Rück-Laserlichts in Abhängigkeit von dessen Rück-Laserlicht-Frequenz bewirkt, (e) Erfassen einer Referenz-Phase  $\varphi_{\text{ref}}$  des Rück-Laserlichts mittels einer Referenz-Fotodiode vor der Dispersionszelle, (f) Bestimmen der Geschwindigkeit aus der Referenz-Phase  $\varphi_{\text{ref}}$  und der Signal-Phasenlage  $\varphi_{\text{signal}}$ .

**[0010]** Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein gattungsgemäßes LIDAR-System, das (c) eine Dispersionszelle, die im Betrieb eine Phasenverschiebung des Rück-Laserlichts in Abhängigkeit von dessen Rück-Laserlicht-Frequenz bewirkt, (d) eine Signal-Fotodiode, die hinter der Dispersionszelle angeordnet ist und ausgebildet ist zum Erfassen einer Signal-Phasenlage  $\varphi_{\text{signal}}$  des Rück-Laserlichts, (e) eine Referenz-Fotodiode, die vor der Dispersionszelle angeordnet ist und ausgebildet ist zum Erfassen einer Referenz-Phase  $\varphi_{\text{ref}}$  des Rück-Laserlichts, und (f) eine Auswerteeinheit, die ausgebildet ist zum automatischen Bestimmen der Geschwindigkeit aus der Referenz-Phase  $\varphi_{\text{ref}}$  und der Signal-Phasenlage  $\varphi_{\text{signal}}$ , aufweist.

**[0011]** Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass kleine Geschwindigkeiten des Zielobjekts mit geringer Messunsicherheit gemessen werden können. Durch die hohe Dispersion des Materials in der Dispersionszelle führt bereits eine kleine Änderung der Frequenzdifferenz zwischen der Mess-Frequenz und der Frequenz des Rück-Laserlichts zu einer starken Änderung einer Phasendifferenz zwischen Referenz-Phase und Signal-Phasenlage. Dadurch lässt sich die Änderung der Frequenzdifferenz und damit die Doppler-Frequenzverschiebung  $f_D$  mit hoher Genauigkeit bestimmen. Aus der Doppler-Frequenz lässt sich wiederum die Relativgeschwindigkeit des Zielobjekts relativ zur Laserquelle mit geringerer Messunsicherheit berechnen.

**[0012]** Vorteilhaft ist zudem, dass die Reduktion der Messunsicherheit meistens auch bei hohen Relativgeschwindigkeiten erreichbar ist, wenn - wie gemäß einer bevorzugten Ausführung vom vorgesehenen - die Mess-Frequenz automatisch so geregelt wird, dass die Frequenz des in die Dispersionszelle einfallenden Lichts in dem Intervall liegt, in dem die resultierende Phasenverschiebung zumindest im Wesentlichen linear von der Frequenz abhängt. Das wird insbesondere dadurch erreicht, dass die Mess-Frequenz so geregelt wird, dass die Dopplerfrequenzverschiebung ausgeglichen wird.

**[0013]** Der Brechungsindex  $n$  des Materials in der Dispersionszelle hängt von der Frequenzdifferenz zwischen Mess-Laserstrahl und Kontroll-Laserstrahl ab.

**[0014]** Vorzugsweise umfasst das Verfahren den Schritt eines Bestimmens der Doppler-Frequenzverschiebung  $\Delta f_D$  aus der Referenz-Phase  $\varphi_{\text{ref}}$  und der Signal-Phasenlage  $\varphi_{\text{signal}}$  nach  $\Delta f_D = k^*(\varphi_{\text{signal}} - \varphi_{\text{pref}})$ .  $k$  wird vorab durch Kalibrieren gemessen.

**[0015]** Vorzugsweise handelt es sich bei der Dispersionszelle um eine EIT-Zelle. Eine EIT-Zelle ist ein Bauteil, in dem sich ein Material befindet, das bei einer EIT-Frequenz elektromechanisch induzierte Transparenz zeigt. Um die EIT-Frequenz herum existiert ein Linearitätsintervall, in dem die Phasenverschiebung, die von dem EIT-Material bewirkt wird, linear von einer Frequenzabweichung zwischen der EIT-Frequenz und der Frequenz des in die EIT-Zelle eingestrahlt Lichts abhängt.

**[0016]** Die EIT-Zelle kann beispielsweise Metalldampf enthalten. Rubidiumdampf und Berylliumdampf haben sich als geeignet herausgestellt.

**[0017]** Alternativ kann die Dispersion-Zelle zumindest zwei gekoppelte Resonatoren aufweisen.

**[0018]** Vorzugsweise umfasst das Verfahren die Schritte (a) Erzeugen eines Kontroll-Laserstrahls

mit einer Kontroll-Frequenz  $f_{14}+f_O$ , die sich um eine Offsetfrequenz  $f_O$  von der Mess-Frequenz  $f_{14}$  unterscheidet, und (b) Überlagern des Kontroll-Laserstrahls und des Rück-Laserstrahls und Leiten der Laserstrahlen durch eine EIT-Zelle, sodass die Dispersionszelle für die Rücklaserlicht-Frequenz transparent wird. Eine EIT-Zelle zeigt einen starken Dispersionseffekt und ist gut als Dispersionszelle geeignet.

**[0019]** Günstig ist es, wenn das Verfahren die folgenden Schritte aufweist: (a) Interferieren-Lassen des Rück-Laserlichts mit dem Mess-Laserstrahl, sodass eine Roh-Doppler-frequenzverschiebung erhalten wird, und (b) Regeln der Mess-Frequenz auf eine vorgegebene Soll-Messfrequenz anhand der Roh-Dopplerfrequenzverschiebung. In diesem Fall liegt die Frequenz des Rück-Lichts, das in die Dispersionszelle einfällt, unabhängig von der Geschwindigkeit des Zielobjekts im Linearitätsintervall der Dispersionszelle.

**[0020]** Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

**Fig. 1** eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen LIDAR-Systems und

**Fig. 2** in der **Fig. 2a** die Abhängigkeit der Absorption einer Dispersionszelle in Form einer EIT-Zelle von einer Abweichung von einer EIT-Frequenz, in der **Fig. 2b** die Abhängigkeit der Dispersion von der Abweichung von der EIT-Frequenz und in der **Fig. 2c** eine zweite Ausführungsform eines erfindungsgemäßen LIDAR-Systems.

**[0021]** **Fig. 1** zeigt eine schematische Ansicht eines erfindungsgemäßen LIDAR-Systems 10, das eine Laserquelle 12 zum Erzeugen eines Mess-Laserstrahls 14. Der Mess-Laserstrahl 14 hat eine Mess-Frequenz  $f_{14}$  und wird auf ein Zielobjekt 16 abgegeben. Es kann sich bei dem Zielobjekt 16 um einen Retroreflektor handeln, das ist aber nicht notwendig.

**[0022]** Die Mess-Frequenz  $f_{14}$  kann durch Modulieren einer Grund-Frequenz  $f_p$  mit einer Modulationsfrequenz  $f_M$  erzeugt werden. Die Modulationsfrequenz liegt vorzugsweise im Megahertzbereich. Dann gilt enthält der Mess-Laserstrahl die Frequenzen

$$f_{14} = f_p \quad (1)$$

und

$$f_{14} = f_p + f_M \quad (2)$$

**[0023]** Das LIDAR-System 10 ist ausgebildet zum Erfassen von Rück-Laserlicht 18, das vom Zielobjekt

16 reflektiert wurde. Der Name Rück-Laserlicht soll andeuten, dass dieses Licht aus dem Mess-Laserstrahl entstanden ist. Es ist nicht notwendig, dass das Rück-Laserlicht kohärent ist. Insbesondere kann die Reflexion am Zielobjekt 16 eine diffuse Reflexion sein.

**[0024]** Das Rück-Laserlicht 18 hat eine Rücklaserlicht-Frequenz  $f_{18}$ , die sich um eine Doppler-Frequenzverschiebung  $f_D$  von der Mess-Frequenz  $f_{14}$  unterscheidet, es gilt daher

$$f_{18} = f_{14} + f_D; f_D \text{ kann negativ sein.} \quad (3)$$

**[0025]** Das Rück-Laserlicht 18 wird durch eine Dispersionszelle 20 geleitet, bei der es sich im vorliegenden Fall um eine EIT-Zelle handelt. In der Dispersionszelle 20 ist Rubidiumdampf enthalten. In Strahlausbreitungsrichtung R hinter der Dispersionszelle 20 ist eine Signal-Fotodiode 20 angeordnet.

**[0026]** Auf die Signal-Fotodiode 22 trifft damit Licht mit den Frequenzen  $f_p + f_M$  und  $f_{14} + f_D = f_p + f_M + f_D$  (siehe Gleichungen (2) und (3)). Insbesondere entstehen so die Mischfrequenzen

$$f_M + f_D \text{ und } f_M - f_D \quad (4)$$

$f_M + f_D$  wird als Signal-Frequenz  $f_{\text{signal}} = f_M + f_D$  herausgefiltert. Die Phase der Signal-Frequenz ist eine Signal-Phasenlage  $\varphi_{\text{signal}}$ .

**[0027]** In Signalausbreitungsrichtung R vor der Dispersionszelle 20 ist eine Referenz-Fotodiode 24 angeordnet. Auf die Referenz-Fotodiode 24 fällt Rück-Laserlicht 18, das die Frequenzen

$$f_{18} = f_{14} + f_D = f_p + f_D \text{ und } f_{18} = f_{14} + f_D = f_p + f_M + f_D \quad (5)$$

enthält. Da die Modulationsfrequenz  $f_M$  im Megahertzbereich liegt, ist sie bei kleinen Geschwindigkeiten  $v$  deutlich kleiner als die Doppler-Frequenzverschiebung  $f_D$ . Es wird nur der Frequenzanteil um die Modulationsfrequenz  $f_M$  herausgefiltert, sodass die Referenz-Frequenz

$$f_M + f_D \quad (6)$$

verbleibt, die eine Referenz-Phase  $\varphi_{\text{ref}}$  hat. Die Referenz-Phase  $\varphi_{\text{ref}}$  unterscheidet sich von der Signal-Phasenlage  $\varphi_{\text{signal}}$ , da das Rück-Laserlicht 18 vor dem Bestimmen der Signal-Phasenlage  $\varphi_{\text{signal}}$  durch die Dispersionszelle 20 gelaufen ist.

**[0028]** Die Signal-Fotodiode 22 bestimmt die Signal-Phasenlage  $\varphi_{\text{signal}}$  des Rück-Laserlichts 18 hinter der Dispersionszelle 20 relativ zur Referenz-Phase  $\varphi_{\text{ref}}$  des Rück-Laserlichts vor der Dispersionszelle 20. Es ergibt sich eine Phasendifferenz

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{signal}} - \varphi_{\text{ref}} \quad (7)$$

**[0029]** Die Signal-Fotodiode 22 und Referenz-Fotodiode 24 geben elektrische Signale an eine Auswerteeinheit 26 ab, aus denen die Auswerteeinheit 26 eine Geschwindigkeit  $v$  des Zielobjekts 16 relativ zum LIDAR-System 10 berechnet. Das geschieht nach der Formel

$$\Delta f_D = k * \Delta\varphi = k * (\varphi_{\text{signal}} - \varphi_{\text{ref}}) \quad (8)$$

**[0030]** Darin ist  $k$  ein Kalibrierfaktor, der in einem Vorversuch bestimmt wird. Damit die Dispersionszelle 20 für das Rück-Laserlicht 18 transparent ist, wird von der Laserquelle 12 ein Kontroll-Laserstrahl 28 mit einer Kontroll-Frequenz  $f_{28}$  erzeugt, die sich um eine Offsetfrequenz  $f_O$  von der Mess-Frequenz  $f_{14}$  unterscheidet. Es gilt folglich

$$f_{28} = f_{14} + f_M(-f_M + f_O) = f_p + f_O \quad (9)$$

**[0031]** Dass die Offsetfrequenz  $f_O$  in Bezug auf die Grund-Frequenz  $f_p$  definiert ist, dient lediglich der einfacheren Erläuterung des Verfahrens.

**[0032]** Mittels eines Überlagerungselements 30, im vorliegenden Fall eines polarisationssensitiven Strahlteilers 30.1, wird der Kontroll-Laserstrahl 28 mit dem Rück-Laserlicht 18 überlagert, sodass ein Überlagerungs-Laserstrahl 32 entsteht. Dieser Überlagerungs-Laserstrahl 32 wird durch die Dispersionszelle 20 geleitet. Die Kontroll-Frequenz  $f_{28}$  ist so gewählt, dass Dispersionszelle 20 für das Rück-Laserlicht 18 transparent wird.

**[0033]** Vor dem Eintritt in die Dispersionszelle 20 durchläuft der Überlagerungs-Laserstrahl 32 ein Polarisationsänderungselement 34.1, im vorliegenden Fall ein erstes  $\lambda/4$ -Plättchen. Nach dem Durchtritt durch die Dispersionszelle 20 durchläuft der Überlagerungs-Laserstrahl 32 ein weiteres Polarisationsänderungselement 34.2, hier wieder in Form eines  $\lambda/4$ -Plättchens, und einen zweiten polarisationssensitiven Strahlteiler 30.2, der den Kontroll-Laserstrahl 28 ablenkt, sodass nur das Rück-Laserlicht 18 auf die Signal-Fotodiode 22 trifft.

**[0034]** Fig. 2a zeigt die Abhängigkeit der Absorption der Dispersionszelle 20 von der Abweichung der Frequenz des einfallenden Lichts von der Mess-Frequenz  $f_{14}$ . Es ist zu erkennen, dass die Dispersionszelle 20 für Licht mit einer Frequenz, die nur wenig von der Mess-Frequenz  $f_{14}$  abweicht, transparent ist.

**[0035]** Fig. 2b zeigt die Abhängigkeit der Dispersion der Dispersionszelle 20 von der Abweichung der Frequenz des einfallenden Lichts von der Mess-Frequenz  $f_{14}$ . In einem Linearitätsintervall  $L$  hängen die Dispersion und damit der Brechungsindex  $n$  linear

von der Abweichung der jeweiligen Frequenz von der Mess-Frequenz  $f_{14}$  ab. Aus diesem Grund ist die Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  ungleich 0. Der Kalibrierfaktor  $k$  ergibt sich aus der Steigung der Kurve in **Fig. 2b** im Linearitätsintervall  $L$ .

**[0036]** **Fig. 1** zeigt, dass das Rück-Laserlicht 18 auf einen dritten Strahlteiler 30.3 trifft. Ein erster Teilstrahl 36.1 wird auf die Referenz-Fotodiode 24 geleitet. Ein zweiter Teilstrahl 36.2 passiert den zweiten Strahlteiler 30.3 und fällt auf den ersten Strahlteiler 30.1.

**[0037]** Zwischen dem dritten Strahlteiler 30.3 und der Referenz-Fotodiode 24 ist ein zweites Polarisationsänderungselement 34.2 angeordnet, dass im vorliegenden Fall ein  $\lambda/4$ -Plättchen ist. Zwischen dem dritten Strahlteiler 30.3 und der Referenz-Fotodiode 24 ist zudem ein teildurchlässiger Spiegel 38 angeordnet, der einen Teil des auftretenden Lichts, beispielsweise im Wesentlichen die Hälfte, durch den zweiten Strahlteiler 30.3 auf eine Doppler-Fotodiode 40 reflektiert. Dieses Licht interferiert mit dem Mess-Laserstrahl 14 auf der Doppler-Fotodiode 40. Der Mess-Laserstrahl 14 kann beispielsweise durch den dritten Strahlteiler 30.3 auf die Doppler-Fotodiode 40 geleitet werden.

**[0038]** Beim Interferieren entsteht insbesondere die Roh-Dopplerfrequenzverschiebung  $f_{D,roh}$ . Diese Roh-Dopplerfrequenzverschiebung  $f_{D,roh}$  entspricht derjenigen Frequenz, die bei herkömmlichen LIDAR-Systemen zum Bestimmen der Geschwindigkeit  $v$  des Zielobjekts 16 verwendet wird.

**[0039]** Die Laserquelle 12 kann anhand der Roh-Dopplerfrequenzverschiebung  $f_{D,roh}$  so geregelt werden, dass die Summe aus Modulationsfrequenz  $f_M$  und Doppler-Frequenzverschiebung  $f_D$ , die als Soll-Messfrequenz  $f_{14,soll}$  bezeichnet werden kann, konstant bleibt. In anderen Worten wird die Mess-Frequenz anhand der Roh-Dopplerfrequenzverschiebung  $f_{D,roh}$  auf die Soll-Messfrequenz  $f_{14,soll}$  geregelt. Dann fällt stets Licht einer konstanten Frequenz in die Dispersionszelle 20 ein.

**[0040]** Die Regelung der Summe aus Modulationsfrequenz  $f_M$  und Doppler-Frequenzverschiebung  $f_D$  anhand des Signals der Doppler-Fotodiode 40 hat einen Regelfehler. Das heißt, dass die Summe  $f_M + f_D$  zeitlich schwankt. Diese Schwankung ist aber so klein, dass die Frequenz des Lichts, das in die Dispersionszelle 20 einfällt, stets innerhalb des Linearitätsintervall  $L$  ist, und wird anhand der Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  erfasst. Auf diese Weise ist eine Geschwindigkeitsmessung mit geringer Messunsicherheit in einem weiten Bereich der Geschwindigkeit  $v$  möglich.

**[0041]** Alternativ oder zusätzlich wird die Laserquelle 12 anhand der Roh-Dopplerfrequenzverschiebung so geregelt, dass das Rück-Laserlicht 18 eine vorgegebene Soll-Rücklaserlichtfrequenz hat.

**[0042]** Um zu erreichen, dass der Mess-Laserstrahl 14 und/oder das Rück-Laserlicht 18 wie angegeben auf die Referenz-Fotodiode 24 und die Doppler-Fotodiode 40 fallen, ist zwischen dem ersten Strahlteiler 30.1 ein zweites Polarisationsänderungselement 34.2 angeordnet. Zudem ist in Strahlausbreitungsrichtung  $R$  hinter dem Strahlteiler 30.3 ein drittes Polarisationsänderungselement 34.3 angeordnet.

**[0043]** **Fig. 2c** zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen LIDAR-Systems 10, bei dem die Dispersionszelle 20 zumindest zwei gekoppelte Resonatoren 42.1, 42.2 aufweist.

#### Bezugszeichenliste

10	LIDAR-System
12	Laserquelle
14	Mess-Laserstrahl
16	Zielobjekt
18	Rück-Laserlicht
20	Dispersionszelle
22	Signal-Fotodiode
24	Referenz-Fotodiode
26	Auswerteeinheit
28	Kontroll-Laserstrahl
30	Strahlteiler
32	Überlagerungs-Laserstrahl
34	Polarisationsänderungselement
36	Teilstrahl
38	teildurchlässiger Spiegel
40	Doppler-Fotodiode
42	Resonator
$\varphi_{ref}$	Referenz-Phase
$\varphi_{signal}$	Signal-Phasenlage
$\Delta\varphi$	Phasendifferenz
$f_{14}$	Mess-Frequenz
$f_{18}$	Rücklaserlicht-Frequenz
$f_{28}$	Kontroll-Frequenz
$f_D$	Doppler-Frequenzverschiebung
$f_M$	Modulationsfrequenz
$f_O$	Offsetfrequenz

$f_p$	Grund-Frequenz
$f_{\text{rück}}$	Rücklaserlicht-Frequenz
$f_{\text{Signal}}$	Signal-Frequenz
$f_{14,\text{soll}}$	Soll-Messfrequenz
$k$	Kalibrierfaktor
$L$	Linearitätsintervall
$n$	Brechungsindex
$R$	Strahlausbreitungsrichtung
$v$	Geschwindigkeit

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Messung der Geschwindigkeit ( $v$ ) eines Zielobjekts (16) mittels LIDAR, mit den Schritten:

- Erzeugen eines Mess-Laserstrahls (14) mit zumindest einer Mess-Frequenz ( $f_{14}$ ),
- Senden des Mess-Laserstrahls (14) zum Zielobjekt (16),
- Erfassen von Rück-Laserlicht (18), das vom Zielobjekt (16) reflektiert wurde,
- Erfassen einer Signal-Phasenlage ( $\varphi_{\text{signal}}$ ) des Rück-Laserlichts (18) hinter einer Dispersionszelle (20), wobei die Dispersionszelle (20) eine Phasenverschiebung des Rück-Laserlichts (18) in Abhängigkeit von dessen Rück-laserlicht-Frequenz ( $f_{18}$ ) bewirkt,
- Erfassen einer Referenz-Phase ( $\varphi_{\text{ref}}$ ) des Rück-Laserlichts (18) mittels einer Referenz-Fotodiode (24) vor der Dispersionszelle (20), und
- Bestimmen der Geschwindigkeit ( $v$ ) aus der Referenz-Phase ( $\varphi_{\text{ref}}$ ) und der Signal-Phasenlage ( $\varphi_{\text{signal}}$ ).

2. Verfahren nach Anspruch 1, **gekennzeichnet durch** die Schritte

- Erzeugen eines Kontroll-Laserstrahls (28) mit einer Kontroll-Frequenz ( $f_{14}+f_o$ ), die sich um eine Offsetfrequenz ( $f_o$ ) von der Mess-Frequenz ( $f_{14}$ ) unterscheidet, und
- Überlagern des Kontroll-Laserstrahls (28) und des Rück-Laserlichts (18) und Leiten der Laserstrahlen durch eine EIT-Zelle, sodass die Dispersionszelle (20) für die Rücklaserlicht-Frequenz ( $f_{\text{rück}}$ ) transparent wird.

3. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** die Schritte

- Interferieren-Lassen des Rück-Laserlichts (18) mit dem Mess-Laserstrahl (14), sodass eine Roh-Dopplerfrequenzverschiebung erhalten wird, und
- Regeln der Mess-Frequenz (14) auf eine vorgegebene Soll-Messfrequenz ( $f_{14,\text{soll}}$ ) anhand der Roh-Dopplerfrequenzverschiebung.

4. LIDAR-System (10) mit

- einer Laserquelle (12) zum Erzeugen eines Mess-Laserstrahls (14) mit zumindest einer Mess-Frequenz ( $f_{14}$ ),
- wobei das LIDAR-System (10) ausgebildet ist zum Senden des Mess-Laserstrahls (14) zu einem Zielobjekt (16) und
- wobei das LIDAR-System (10) ausgebildet ist zum Erfassen von Rück-Laserlicht (18), das vom Zielobjekt (16) reflektiert wurde, **gekennzeichnet durch**
- eine Dispersionszelle (20), die im Betrieb eine Phasenverschiebung des Rück-Laserlichts (18) in Abhängigkeit von dessen Rücklaserlicht-Frequenz ( $f_{18}$ ) bewirkt,
- eine Signal-Fotodiode (22), die hinter der Dispersionszelle (20) angeordnet ist und ausgebildet ist zum Erfassen einer Signal-Phasenlage ( $\varphi_{\text{signal}}$ ) des Rück-Laserlichts (18),
- eine Referenz-Fotodiode (24), die vor der Dispersionszelle (20) angeordnet ist und ausgebildet ist zum Erfassen einer Referenz-Phase ( $\varphi_{\text{ref}}$ ) des Rück-Laserlichts (18), und
- eine Auswerteeinheit (26), die ausgebildet ist zum automatischen Bestimmen der Geschwindigkeit ( $v$ ) aus der Referenz-Phase ( $\varphi_{\text{ref}}$ ) und der Signal-Phasenlage ( $\varphi_{\text{signal}}$ ).

5. LIDAR-System (10) nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- die Dispersionszelle (20) eine EIT-Zelle ist, in der sich Metaldampf befindet,
- die Laserquelle (12) ausgebildet ist zum Erzeugen eines Kontroll-Laserstrahls (28) mit einer Kontroll-Frequenz ( $f_{14}+f_o$ ), die sich um eine Offsetfrequenz ( $f_o$ ) von der Mess-Frequenz ( $f_{14}$ ) unterscheidet,
- das LIDAR-System (10) ein Überlagerungselement, das ausgebildet ist zum Überlagern des Kontroll-Laserstrahls (28) und des Mess-Laserstrahls (14), sodass ein Überlagerungs-Laserstrahl (32) entsteht, aufweist und das angeordnet ist zum Leiten des Überlagerungs-Laserstrahls (32) durch die EIT-Zelle und dass
- die Dispersionszelle (20) für die Mess-Frequenz ( $f_{14}$ ) beim Einstrahlen des Überlagerungs-Laserstrahls (32) transparent ist.

6. LIDAR-System (10) nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Dispersionszelle (20) zumindest zwei gekoppelte Resonatoren (42) aufweist.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

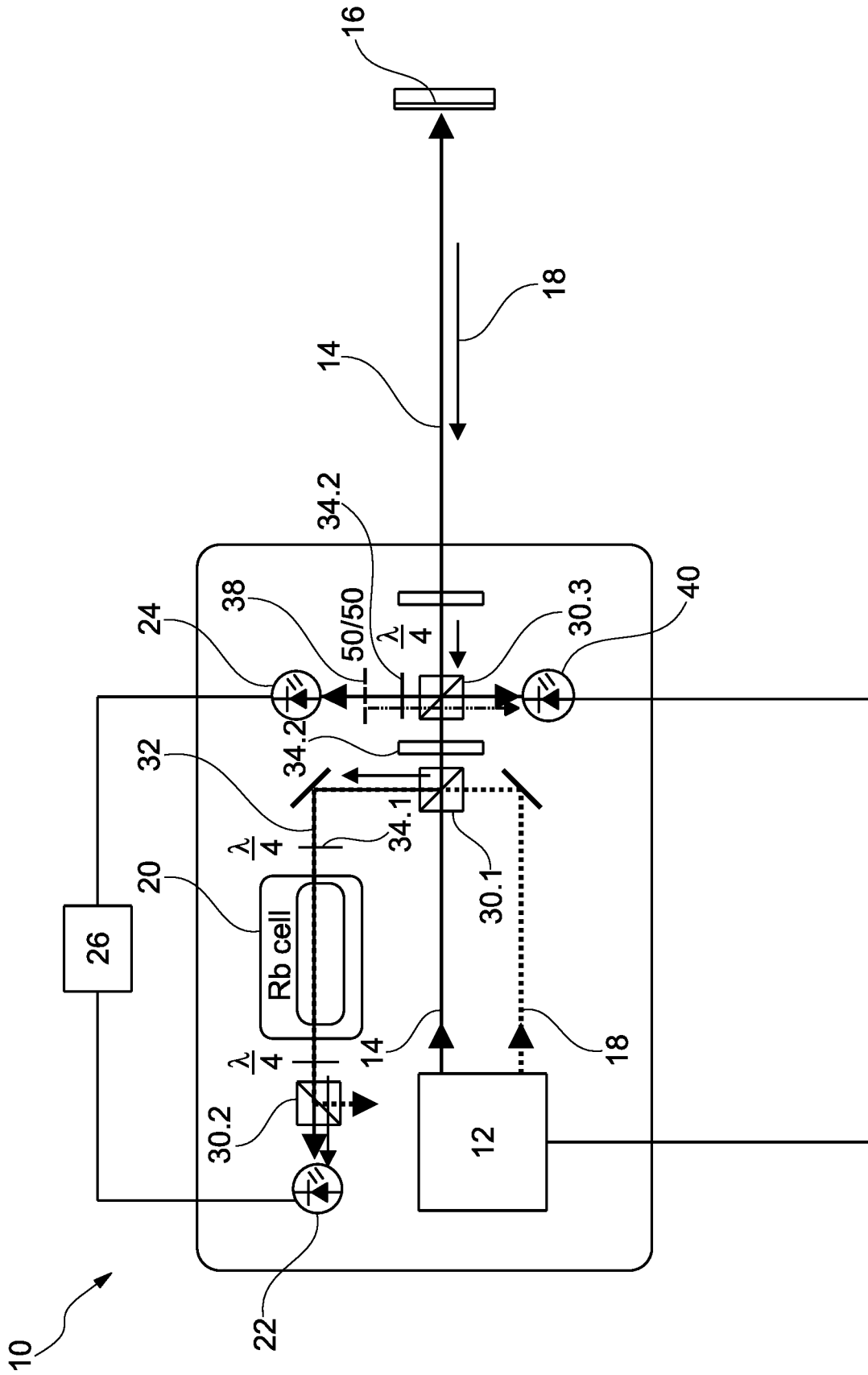


Fig. 1

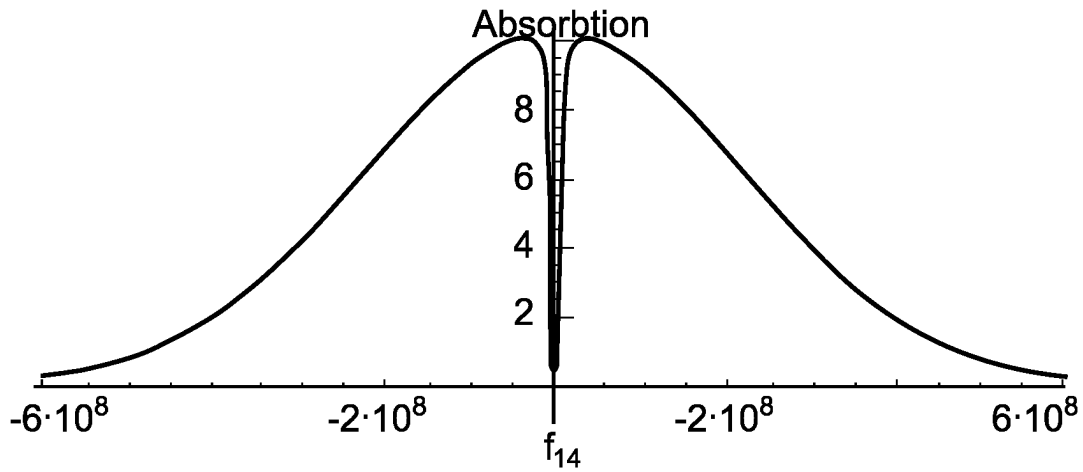


Fig. 2a

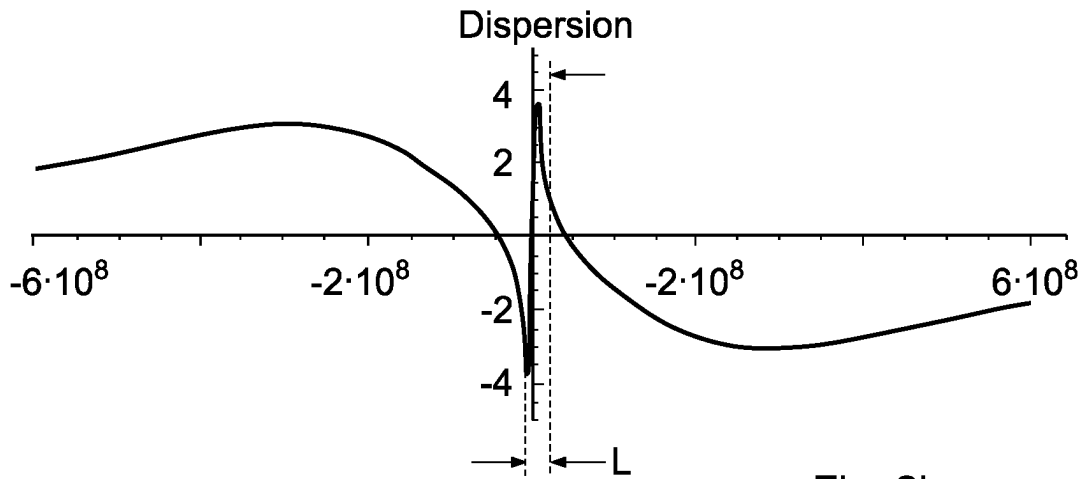


Fig. 2b

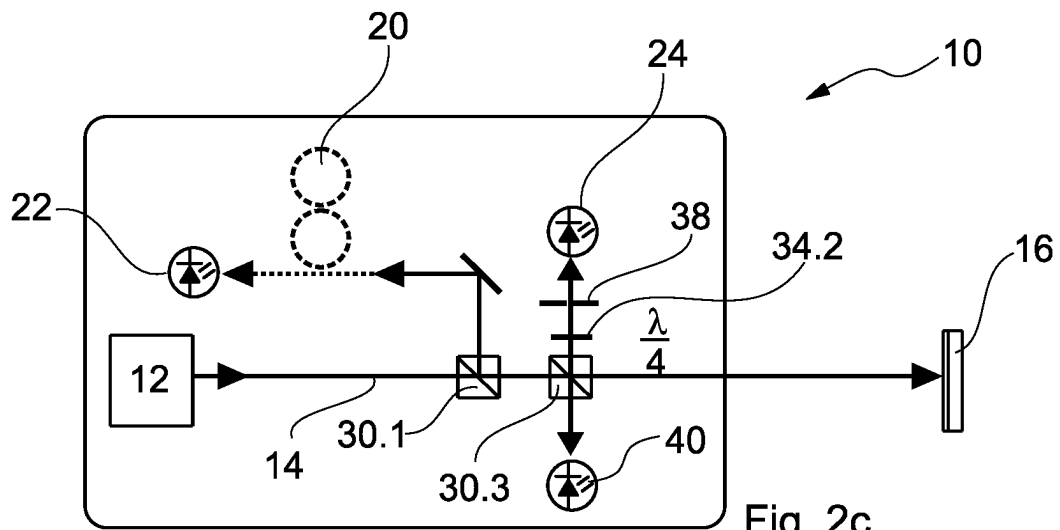


Fig. 2c

Fig. 2