(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2018 109 014 A1** 2019.10.17

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2018 109 014.5**
(22) Anmeldetag: **17.04.2018**
(43) Offenlegungstag: **17.10.2019**

(51) Int Cl.: ***G01S 7/483*** (2006.01)
G01S 17/08 (2006.01)

(71) Anmelder:
SICK AG, 79183 Waldkirch, DE

(74) Vertreter:
Hehl, Ulrich, Dipl.-Phys. Dr. rer. nat., 79183 Waldkirch, DE

(72) Erfinder:
Gimpel, Hartmut, 79194 Gundelfingen, DE; Marra, Martin, 79280 Au, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

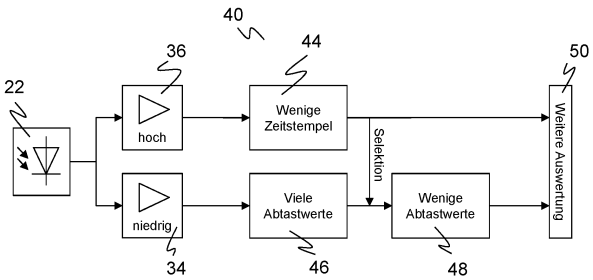
DE	**10 2011 056 963**	**B3**
DE	**10 2014 106 463**	**A1**
EP	**3 438 699**	**A1**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Optoelektronischer Sensor und Verfahren zur Erfassung und Abstandsbestimmung eines Objekts**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein optoelektronischer Sensor (10) zur Erfassung und Abstandsbestimmung mit einem Lichtsender (12) zum wiederholten Aussenden von Lichtpulsen für jeweils eine Einzelmessung, einem Lichtempfänger (22) zum Erzeugen eines Empfangssignals aus einem von dem Objekt (20) remittierten Lichtpuls, einer ersten Abtasteinheit (34) zum Abtasten des Empfangssignals mit einer niedrigen Schwelle und einer zweiten Abtasteinheit (36) zum Abtasten des Empfangssignals mit einer hohen Schwelle, einem Speicher (42) zum Ablegen von Abtastwerten der ersten Abtasteinheit (34) und/oder der zweiten Abtasteinheit (36) oder daraus abgeleiteter Größen und einer Steuer- und Auswertungseinheit (38, 40) angegeben, die dafür ausgebildet ist, nach mehreren Einzelmessungen mit Hilfe der in dem Speicher (42) abgelegten Daten einen Messwert für die Lichtlaufzeit von dem Sensor (10) zu dem Objekt (20) zu bestimmen und weiterhin Abtastwerte der ersten Abtasteinheit (34) oder daraus abgeleitete Größen nur dann in dem Speicher (42) abzulegen, wenn die zweite Abtasteinheit (36) für dieselbe Einzelmessung ein Überschreiten der hohen Schwelle feststellt.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen optoelektronischen Sensor und ein Verfahren zur Erfassung und Abstandsbestimmung eines Objekts in einem Überwachungsbereich nach dem Oberbegriff von Anspruch 1 beziehungsweise 12.

[0002] Bei optoelektronischen Sensoren nach dem Prinzip des Lichtlaufzeitverfahrens werden Lichtsignale ausgesandt, und die Zeit bis zum Empfang der an Objekten remittierten oder reflektierten Lichtsignale wird gemessen. Optoelektronische Entfernungsmessung kann beispielsweise in der Fahrzeugsicherheit, der Logistik- oder Fabrikautomatisierung oder der Sicherheitstechnik benötigt werden. Meist ist die gesuchte Ausgabegröße der gemessene Abstand. Alternativ kann ein Entfernungsmesser nach dem Lichtlaufzeitverfahren auch schaltend arbeiten, indem eine Entfernungsänderung eines in einem bestimmten Abstand erwarteten Reflektors oder eines reflektierenden oder remittierenden Objekts erkannt wird. Eine besondere Anwendung ist eine Reflexionslichtschranke mit Überwachung des Abstandes zu ihrem Reflektor.

[0003] Das Lichtlaufzeitverfahren ist auch das Prinzip, nach dem entfernungsmessende Laserscanner arbeiten, die periodisch eine Überwachungsebene oder sogar einen dreidimensionalen Raumbereich abtasten. Speziell in der Sicherheitstechnik werden sichere Laserscanner eingesetzt, die konfigurierbare Schutzfelder auf unzulässige Eingriffe überwachen. Sichere Sensoren müssen besonders zuverlässig arbeiten und deshalb hohe Sicherheitsanforderungen erfüllen, beispielsweise die Norm EN 13849 für Maschinensicherheit und die Gerätenorm EN61496 für berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen (BWS). Zur Erfüllung dieser Sicherheitsnormen sind eine Reihe von Maßnahmen zu treffen, wie beispielsweise sichere elektronische Auswertung durch redundante, diversitäre Elektronik, Funktionsüberwachung oder speziell Überwachung der Verschmutzung optischer Bauteile, insbesondere einer Frontscheibe, und/oder Vorsehen von einzelnen Testzielen mit definierten Reflexionsgraden, die unter den entsprechenden Scanwinkeln erkannt werden müssen.

[0004] Die Genauigkeit der Entfernungsmessung hängt entscheidend davon ab, wie gut der Empfangszeitpunkt bestimmt werden kann. Herkömmliche Pulsverfahren senden einen Einzelpuls und bestimmen die Lage des daraufhin empfangenen Echopulses. Dabei wird der Echopuls durch eine Komparatorschwelle von Störsignalen unterschieden.

[0005] Beispielsweise aus EP 1 972 961 A2 ist ein Laufzeitverfahren bekannt, das anstelle einer Einzelpulsauswertung eine Vielzahl von Einzelmessungen mit jeweils einem Sendepuls durchführt und die jeweiligen Empfangssignale in einem Histogramm aufaddiert. Durch diese statistische Auswertung addiert sich das Nutzsignal, während zufällige Rauscheinflüsse ausgemittelt werden, so dass das Signal-Rausch-Verhältnis deutlich verbessert wird. Eine Besonderheit des Verfahrens ist, dass verschiedene Maßnahmen getroffen werden, um diese komplexere Auswertung auf besonders kostengünstiger Hardware durchführen zu können. Dazu zählt, dass anstelle eines aufwändigen schnellen A/D-Wandlers lediglich ein Null-Schwellen-Komparator eingesetzt wird, der das Einzelsignal mit nur 1-Bit-Auflösung digitalisiert, also binarisiert.

[0006] Ein Nachteil solcher Pulsmittelungsverfahren ist, dass zur Histogrammbildung zunächst die einzelnen digitalisierten oder binarisierten Empfangssignale zu den Einzelpulsen gespeichert werden müssen, und zwar während der Messung und damit sehr schnell. Ein FPGA, der zum Akkumulieren der Histogramme eingesetzt wird, muss genügend Speicher bereitstellen und auch in der Lage sein, die Daten schnell genug abzulegen, also eine große Speicherbandbreite aufweisen. Das erzwingt die Verwendung eines sehr leistungsfähigen und damit teuren FPGAs, obwohl die übrigen Spezifikationen wie Gatterzahl und dergleichen auch mit einem kostengünstigeren FPGA erfüllt werden könnten. Der Speicherbedarf skaliert sehr ungünstig linear mit der Anzahl der in ein Histogramm eingehenden Einzelmessungen. Die Schwelle zur Binarisierung des Empfangssignals wird relativ niedrig gesetzt, so dass sie zu 10%-50% der Zeitpunkte übertroffen wird, also mit anderen Worten mitten in das Rauschband. Ein überschwelliges Signal ist daher auch kein seltenes Ereignis, das eine komprimierte Datenrepräsentation zuließe.

[0007] In der EP 2 942 644 B1 wird statt einer Digitalisierung oder Binarisierung mit nur einem Bit eine Mehrschwellenabtasteinheit eingesetzt. So wird eine gewisse Amplitudenauflösung der Empfangssignale gewonnen, die mittels eines zusätzlichen Dehnungsfilters für eine noch genauere Lokalisierung des Empfangszeitpunktes genutzt wird. Dadurch fallen aber sogar noch mehr Daten an, nämlich je Abtastzeitpunkt und Einzelmessung nicht mehr nur ein Bit, sondern sogar mehrere Bit.

[0008] Das Datenproblem verschärft sich noch, wenn das zeitliche Abtastraster verfeinert wird, weil dann noch mehr Zeitschritte und damit Daten zu diesen Zeitschritten anfallen. Ein feineres Zeitraster wird aber grundsätzlich angestrebt, weil damit genauere Abstandsmessungen möglich sind.

[0009] Es gibt auch andere Ansätze zur Entfernungsmessung, die speziell auf SPADs (Single-Photon Avalanche Detector) abgestimmt sind. Dabei werden nicht digitalisierte oder binarisierte Empfangssignale betrachtet, sondern es wird direkt mittels

TDCs (time-todigital converter) die Laufzeit gemessen. SPADs lösen aber auch durch Dunkelrauschen oder Fremdlicht Störereignisse aus, die nicht von Messereignissen unterscheidbar sind, und müssen daher statistisch ausgewertet werden. In einem FPGA-basierten Sensor hat man aber gar keinen Zugriff auf die einzelnen SPADs, sondern nur auf deren Summensignal. Mit einem ASIC ist der Einzelzugriff prinzipiell denkbar, aber die Entwicklung eines solchen ASIC ebenso wie spätere Anpassungen sind extrem aufwändig, während ein FPGA auch umprogrammiert werden kann.

[0010] Die EP 3 185 038 A1 offenbart einen derartigen entfernungsmessenden optoelektronischen Sensor mit SPAD-Empfänger. Zur Begrenzung der Datenmenge werden einerseits nicht die Signale der einzelnen SPADs aufgezeichnet, sondern nur die mittels TDC gemessenen Einzellichtlaufzeiten. Zudem werden solche Einzellaufzeiten auch nur akkumuliert, wenn sie innerhalb eines Zeitfensters mit einer vorhergehenden Einzellichtlaufzeit übereinstimmen. Das basiert auf der Annahme, dass Messereignisse eines gemeinsam von den SPADs beobachteten Nutzechos gehäuft auftreten, Störereignisse dagegen zufällig verteilt liegen. Ohne Informationen aus den einzelnen SPADs, in diesem Fall die dort jeweils gemessenen Einzellichtlaufzeiten, ist ein solches Verfahren aber nicht möglich.

[0011] Die US 2012/162632 A1 beschreibt einen weiteren optischen Entfernungsmesser mit SPADs. Hier werden die gemessenen Entfernungen in einem besonderen, durch seinen Inhalt adressierten Speicher kumuliert, um eine Häufigkeitsverteilung zu bekommen. Das unterliegt ähnlichen Voraussetzungen wie die EP 3 185 038 A1. Zusätzlich wird hier noch ein besonderer, durch seinen Inhalt adressierter Speicher benötigt.

[0012] Es ist daher Aufgabe der Erfindung, den Aufbau eines optoelektronischen Sensors für eine Lichtlaufzeitmessung zu vereinfachen.

[0013] Diese Aufgabe wird durch einen optoelektronischen Sensor und ein Verfahren zur Erfassung und Abstandsbestimmung eines Objekts in einem Überwachungsbereich nach Anspruch 1 beziehungsweise 12 gelöst. Ausgangspunkt ist ein Lichtlaufzeitverfahren wie einleitend beschrieben mit mehreren Einzelmessungen durch wiederholt ausgesandten und wieder empfangenen Lichtpulse. Das jeweilige Empfangssignal wird mit einer hohen Schwelle und einer niedrigen Schwelle abgetastet. Die Abtastung erfolgt in einer ersten und zweiten Abtasteinheit, die vorzugsweise jeweils als Binarisierer oder Komparator ausgebildet sind. Es ist ein Speicher vorgesehen, um darin Abtastwerte oder daraus abgeleitete Größen mehrerer Einzelmessungen abzulegen. Eine Steuer- und Auswertungseinheit bestimmt mit Hilfe der in dem Speicher abgelegten Daten aus mehreren Einzelmessungen einen Messwert für die Lichtlaufzeit.

[0014] Die Erfindung geht nun von dem Grundgedanken aus, nicht zu jeder Einzelmessung Daten zu speichern, und dann vorzugsweise auch nicht alle Abtastwerte, sondern nur daraus abgeleitete Größen, wie Zeitpunkte von Schwellenübergängen oder summarische statistische Größen. Deshalb werden mit der niedrigen Schwelle erzeugte Abtastwerte oder daraus abgeleitete Größen nur dann in dem Speicher abgelegt, wenn in derselben Einzelmessung auch die hohe Schwelle zu mindestens einem Zeitpunkt überschritten war. Das mit der hohen Schwelle bewertete Empfangssignal darf also nicht zu einem Nullsignal geführt haben. Umgekehrt lässt sich das gleichermaßen ausdrücken, nämlich dass das Ergebnis der Abtastung mit der niedrigen Schwelle verworfen wird, wenn in derselben Einzelmessung die hohe Schwelle zu keinem Zeitpunkt überschritten wurde. Da in diesem Fall die Abtastung mit der hohen Schwelle als Nullsignal keine nutzbare Information enthält, werden vorzugsweise für diese Einzelmessung auch keine Abtastwerte der zweiten Abtasteinheit oder daraus abgeleitete Größen gespeichert.

[0015] Die Erfindung hat den Vorteil, dass deutlich weniger Daten gespeichert werden müssen. Deshalb können auch kostengünstigere Bauteile eingesetzt werden, beispielsweise einfachere FPGAs mit relativ wenig Speicherblöcken und Speicherbandbreite. Auch die Auswertung der reduzierten Datenmenge vereinfacht sich, so dass weniger Auswertungskapazitäten benötigt werden. Damit verbunden sind Vorteile bei der Wärmeentwicklung und Gehäusegröße. Alternativ können die gewonnenen Ressourcen genutzt werden, um das Zeitraster weiter zu verfeinern und/oder zu verlängern. Dann wird eine höhere Präzision und Reichweite möglich, da trotz höherer Dichte von Zeitpunkten und verlängertem Messintervall der Speicherrahmen nicht gesprengt wird. Eine andere Möglichkeit, die frei gewordenen Ressourcen zu nutzen, ist die Auswertung mehrerer Messstrahlen mit gleicher Elektronik, um Entfernungswerte von mehreren Orten zu erfassen.

[0016] Die niedrige Schwelle ist bevorzugt so gewählt, dass das Empfangssignal zu 10%-80% der Zeit oberhalb liegt und/oder die hohe Schwelle ist gewählt, dass das Empfangssignal zu höchstens 10% der Zeit oberhalb liegt. Die niedrige Schwelle entspricht damit derjenigen nach dem Stand der Technik, die häufig und auch von Empfangssignalen ohne Nutzsignalanteil überschritten ist. Sie liegt typischerweise bei 50%, aber andere Werte im genannten Intervall sind auch denkbar. Die hohe Schwelle dagegen soll nur selten übertroffen werden, nach Möglichkeit ausschließlich durch das Nutzsignal. Es ist daher auch eine strengere hohe Schwelle denk-

bar, die beispielsweise nur zu 5%, 1%, 0,5 %, 0,1% der Zeit und noch weniger überschritten wird. Diese Schwellen werden parametriert oder während des Betriebs eingelernt. Die Kriterien lassen sich auch bezüglich eines Rauschpegels verstehen: Die niedrige Schwelle liegt noch im Rauschband, etwa in dessen 1-Sigma-Umgebung, während die hohe Schwelle erst auf signifikant höhere Empfangspegel beispielsweise oberhalb einer n-Sigma-Umgebung mit n≥3 reagiert. Da der remittierte Lichtpuls ein seltenes Ereignis ist, kann man die genannten Kriterien ebenso auf den reinen Rauschpegel ohne ausgesandte Lichtpulse wie den Messbetrieb beziehen, statistisch sauberer ist es, eine Situation bei inaktivem Lichtsender zu betrachten, also nur das Rauschen. Die Auslegung der Schwellen kann auch nicht bloß auf einzelne Zeit- beziehungsweise Samplingpunkte bezogen sein, sondern die kumulierte Wahrscheinlichkeit aller Samplingpunkte über eine Messperiode, also das Zeitintervall einer Einzelmessung, oder eines Teilintervalls davon etwa entsprechend einem kleinen Vielfachen der Pulsbreite. Eine hohe Schwelle, bei der das Empfangssignal zu höchstens 1% der Zeit oberhalb liegt, bedeutet dann, dass sie nur in 1% der Einzelmessungen oder in 1% von Teilintervallen einer bestimmten an der Pulsbreite orientierten Dauer allein aufgrund des Rauschens mindestens einmal überschritten ist.

[0017] Die Steuer- und Auswertungseinheit ist bevorzugt dafür ausgebildet, die hohe Schwelle dynamisch anzupassen, insbesondere innerhalb einer Einzelmessung in Abhängigkeit von der Entfernung, die der ausgesandte Lichtpuls bereits zurückgelegt hat, von einem Abstand des Objekts und/oder von einer Remission des Objekts. Der remittierte Lichtpuls von einem nahen und/oder hellen Objekt ist deutlich stärker als derjenige von einem fernen und/oder dunkeln Objekt. Darauf kann die hohe Schwelle adaptiert werden, damit sie bei starken zu erwartenden Nutzsignalen noch stärker vom Rauschen trennt und für schwächere zu erwartende Nutzsignale nicht zu viel Empfindlichkeit verloren geht. Bei einer Lichtlaufzeitmessung ist zu jedem Zeitpunkt nach Aussenden des Lichtpulses klar, aus welcher Entfernung ein aktuell empfangener remittierter Lichtpuls stammen würde, wobei natürlich der Rückweg mit berücksichtigt werden muss. Daher kann man die hohe Schwelle dynamisch innerhalb einer Einzelmessung absenken, um dem abstandsbedingten Intensitätsverlust Rechnung zu tragen. Außerdem ist denkbar, die hohe Schwelle auf eine erwartete Objektentfernung oder -remission einzustellen, wobei die Erwartung durch frühere Messung oder allgemeine Annahmen gegeben sein kann beziehungsweise einer Messanforderung entspricht.

[0018] Die Steuer- und Auswertungseinheit ist bevorzugt dafür ausgebildet, einen Zeitpunkt zu speichern, zu dem die zweite Abtasteinheit einen Schwellenübergang des Empfangssignals bezüglich der hohen Schwelle feststellt. Dies ist ein Beispiel einer aus den Abtastwerten abgeleiteten Größe, um nicht das ganze mit der hohen Schwelle binarisierte Empfangssignal speichern zu müssen. Das Ergebnis entspricht demjenigen eines TDC, der auf fallende beziehungsweise steigende Flanken eines entsprechend der hohen Schwelle deutlich ausgeprägten Peaks im Empfangssignal reagiert und so Lichtlaufzeiten bis zum Anfang und/oder Ende von remittierten Lichtpulsen misst. Im Prinzip könnten auch anstelle der Abtastwerte der ersten Abtasteinheit nur Zeitpunkte von Schwellenübergängen abgespeichert werden. Da die niedrige Schwelle aber ständig allein durch Rauschen über- und unterschritten wird, sind die Schwellenübergänge zu häufig, um dadurch effektiv Speicherplatz einzusparen.

[0019] Die Steuer- und Auswertungseinheit ist bevorzugt dafür ausgebildet, Abtastwerte der ersten Abtasteinheit nur in einer zeitlichen Umgebung eines von der zweiten Abtasteinheit festgestellten Schwellenübergangs zu speichern. Dazu wird vorzugsweise auch der Beginn der zeitlichen Umgebung abgespeichert, um sie in der späteren Auswertung zeitlich einordnen zu können. Das ist nicht erforderlich, wenn die Abtastwerte der ersten Abtasteinheit wie in einer später erläuterten Ausführungsform nur für eine Intensitätsmessung genutzt werden. Die Beschränkung auf die zeitliche Umgebung führt zu einer weiteren erheblichen Einsparung von Speicherbedarf, und Messdaten außerhalb der Umgebung tragen zu einer Lichtlaufzeitmessung ohnehin nicht bei. Die Dauer der zeitlichen Umgebung wird vorzugsweise an der Pulsbreite des ausgesandten Lichtpulses orientiert und beträgt beispielsweise ein bis fünf Pulsbreiten. Damit werden die relevanten Messpunkte bereits zuverlässig erfasst. Es ist auch denkbar, abgeleitete Größen zu speichern, etwa den Zeitpunkt eines remittierten Lichtpulses oder die Pulsform beschreibende Größen wie dessen Breite und Amplitude.

[0020] Die Steuer- und Auswertungseinheit ist bevorzugt dafür ausgebildet, Abtastwerte der ersten Abtasteinheit oder daraus abgeleitete Größen nur für eine vorgegebene Anzahl von Einzelmessungen zu speichern, insbesondere für diejenigen Einzelmessungen mit den meisten Überschreitungen der hohen Schwelle in der zweiten Abtasteinheit. In dieser Ausführungsform steht beispielsweise nur Speicher für fünf bis zehn Einzelmessungen zur Verfügung, oder sogar nur für entsprechend viele Umgebungen wie im Vorabsatz erläutert. Damit genügt bereits ein sehr kleiner Speicher. Die verfügbaren Speicherbereiche werden mit den mutmaßlich verlässlichsten Abtastwerten oder daraus abgeleiteten Größen belegt und gegebenenfalls auch im Laufe der wiederholten Einzelmessungen von einer noch geeigneteren Einzelmessung überschrieben. Ein Kriterium ist die Häufigkeit, mit der in der jeweiligen Einzelmessung die hohe Schwelle überschritten ist, weil das ein klares An-

zeichen besonders ausgeprägter Messsignale ist. Erneut ist auch denkbar, abgeleitete Größen wie den Zeitpunkt eines remittierten Lichtpulses oder dessen Pulsform beschreibende Größen zu speichern.

[0021] Es wäre alternativ denkbar, Abtastwerte direkt aufzuaddieren. Dadurch wird lediglich ein Speicher benötigt, der nur eine einzige Einzelmessung oder sogar nur eine zeitliche Umgebung eines erwarteten Objektabstands aufnehmen kann und dessen Zellen während der Einzelmessungen modifiziert werden. Dann besteht aber kein Zugriff mehr auf die Ergebnisse der Einzelmessungen. Es ist also nicht möglich, im Nachhinein anhand der hohen Schwelle als weniger signifikant erkannte Einzelmessungen herauszufiltern. Außerdem können Einzelmessungen nicht neu gruppiert werden, was gerade bei einem Laserscanner äußerst nützlich ist, bei dem der ausgesandte Lichtpuls in jeder Einzelmessung aufgrund der zwischenzeitlichen Scanbewegung einen etwas anderen Winkelbereich abtastet.

[0022] Die Steuer- und Auswertungseinheit ist bevorzugt dafür ausgebildet, anstelle von Abtastwerten nur summarische Kennwerte abzuspeichern, insbesondere einen Mittelwert von Abtastwerten. Höhere Momente wie die Varianz sind ebenfalls möglich. Sowohl Mittelwert wie Varianz lassen sich on-the-fly mit nur einer Speicherzelle durch Bilden der Summe der Abtastwerte beziehungsweise der Summe der Quadrate der Abtastwerte bestimmen. Solche Kennwerte sind neben den schon genannten Schwellenübergängen oder beschreibenden Größen einer Pulsform ein weiteres Beispiel von aus den Abtastwerten abgeleiteten Größen. Aus den Kennwerten kann mit geeigneter Modellierung des Rauschens, insbesondere von SPADs, sowie der Lichtpulse die Lichtlaufzeit rekonstruiert werden.

[0023] Zwischen Lichtempfänger und zweiter Abtasteinheit ist bevorzugt ein analoges, auf eine Pulslänge der Lichtpulse abgestimmtes Filter angeordnet. Ein solches Filter erhöht die Sensitivität für tatsächliche Messereignisse, führt aber auch einen intensitätsabhängigen Laufzeitfehler ein. Wenn aber die Abtastung mit der hohen Schwelle nur dazu dient, signifikante Messereignisse herauszufiltern und die eigentliche Messung mit den Ergebnissen der Abtastung der niedrigen Schwelle arbeitet, ist ein solcher Laufzeitfehler nicht relevant. Alternativ wird die Abtastung mit der hohen Schwelle sehr wohl für die Laufzeitmessung herangezogen und der intensitätsabhängige Laufzeitfehler aus der Abtastung mit der niedrigen Schwelle korrigiert, die nicht durch das Filter verzerrt ist, wie sogleich beschrieben.

[0024] Die Steuer- und Auswertungseinheit ist bevorzugt dafür ausgebildet, aus Abtastwerten der ersten Abtasteinheit oder daraus abgeleiteten Größen eine Intensität des remittierten Lichtpulses zu bestimmen. Die Intensität wird insbesondere für eine Helligkeits- oder Schwarz-Weiß-Korrektur der Lichtlaufzeit genutzt. Das kann eine Aufgabenteilung darstellen: mit der hohen Schwelle wird die Lichtlaufzeit gemessen, mit der niedrigen Schwelle werden die intensitätsabhängigen Laufzeitfehler korrigiert. Alternativ werden die Abtastwerte der ersten Abtasteinheit oder daraus abgeleitete Größen auch für eine Lichtlaufzeitmessung genutzt, um diejenige aus der hohen Schwelle zu verbessern oder zu plausibilisieren. Eine Intensitätsmessung aus der Abtastung mit der zweiten Abtasteinheit ist im Prinzip denkbar, insbesondere anhand der Differenz zwischen Zeitpunkten einer Schwellüberschreitung und anschließenden Schwellunterschreitung. Die ist aber vergleichsweise unpräzise, da nur noch ein kleiner Teil des durch den remittierten Lichtpuls erzeugten Peaks im Empfangspuls über der hohen Schwelle liegt und dies die Pulsform nicht mehr ausreichend repräsentiert. Das gilt erst recht, wenn das im vorigen Absatz genannte analoge Filter vorgesehen ist, das die Messinformation hinsichtlich der Pulsform verändert.

[0025] Der Lichtempfänger weist bevorzugt eine Vielzahl von SPAD-Lichtempfangselementen auf, die ein gemeinsames Empfangssignal erzeugen. Das vereinfacht den Aufbau des Sensors, weil die SPADs nicht wie beispielsweise in einem entsprechend angepassten ASIC einzeln ausgelesen werden müssen. Dafür fehlt dann Messinformation, nämlich welche SPAD-Zelle tatsächlich jeweils ausgelöst hat. Viele der einleitend genannten Messverfahren beruhen gerade auf solch differenzierten Messinformationen. Das erfindungsgemäße Verfahren kommt aber auch mit dem summarischen Empfangssignal zurecht und kann daher beispielsweise auch mit einem FPGA implementiert werden. Für SPAD-Lichtempfänger ist ein dichtes Zeitraster der Abtastungen besonders bevorzugt, um die aufgrund der Totzeiten entstehenden, intensitätsabhängigen Pulsformen der remittierten Lichtpulse im Empfangssignal auswerten zu können. Außerdem wird durch das erfindungsgemäße Verfahren ein Vorteil von SPADs, nämlich deren hohe Analogbandbreite, auch wirklich genutzt. Der auf den ersten Blick hohe Speicherbedarf einer schnellen Abtastung ist durch die selektive Speicherung ausgeglichen.

[0026] Die Steuer- und Auswertungseinheit ist bevorzugt dafür ausgebildet, nach Überschreiten der hohen Schwelle in der zweiten Abtasteinheit für ein Zeitintervall weitere Überschreitungen der hohen Schwelle zu ignorieren. Damit soll ein Signalpuls, der die hohe Schwelle überschreitet, möglichst nur einmal berücksichtigt werden. Das Zeitintervall wird dazu vorteilhaft abhängig von der Pulsbreite gewählt. Ansonsten würden sehr viele redundante Ereignisse beziehungsweise direkt aufeinanderfolgende Zeitstempel den vorhandenen Speicher blockieren, der vorzugsweise nur für wenige Ereignisse ausgelegt

ist. Es besteht insbesondere die Möglichkeit, für diesen Zweck die Empfindlichkeit der Lichtempfangselemente vorübergehend herabzusetzen, wodurch die hohe Schwelle vorübergehend nicht mehr übertroffen ist, obwohl das Empfangssignal an sich stark genug dafür wäre. Das Deaktivieren erfolgt bei SPADs vorzugsweise durch Absenken der Vorspannung der SPADs unter die Durchbruchspannung, womit sie vorübergehend um Größenordnungen weniger empfindlich und für praktische Belange inaktiv werden. Das führt nicht nur zu dem gewünschten vorübergehenden Ignorieren einer Überschreitung der hohen Schwelle, sondern verhindert auch, dass zu viele SPADs aktiv werden und dadurch die aufgenommene Leistung unnötig erhöhen beziehungsweise in ihre Totzeit übergehen und in einem mehrzielfähigen System für die Messung fernerer Ziele nicht mehr verfügbar sind.

[0027] Die Steuer- und Auswertungseinheit ist bevorzugt auf einem digitalen Baustein, insbesondere in programmierbarer Logik, in ASIC (Application Specific Integrated Circuit) oder auf einem FPGA (Field Programmable Gate Array) implementiert. Ein derartiger digitaler Baustein ist vergleichsweise kostengünstig und dennoch in der Lage, die Anforderungen an eine hochpräzise Messung zu erfüllen und dabei noch sehr viele der geforderten Funktionen mit zu implementieren, statt dafür zusätzliche Bausteine vorzusehen. Unter digitalem Baustein soll hier und im Folgenden jegliche konfigurierbare digitale Auswertung gemeint sein, die durch Vorkonfiguration der digitalen Verschaltung des Bausteins auf die Anwendung angepasst ist, statt wie bei einem echten Mikroprozessor durch Ablauf eines Programms auf einer universellen Auswertungseinheit zu erfolgen. Die derzeit bevorzugte Variante einer solchen programmierbaren Logik ist ein FPGA. Deshalb wird im Folgenden mehrfach von FPGA stellvertretend für die genannte Familie von digitalen Bausteinen gesprochen, die Erfindung ist aber darauf nicht beschränkt. Es wurde schon darauf hingewiesen, dass aufgrund der Erfindung ein SPAD-Lichtempfänger mit nur summarischem Empfangssignal in Kombination mit einem FPGA eingesetzt werden kann und kein eigenes ASIC entwickelt werden muss, um SPAD-Zellen einzeln auszuwerten.

[0028] Die erste Abtasteinheit und/oder die zweite Abtasteinheit ist bevorzugt über Eingänge des digitalen Bausteins implementiert. Dadurch sind keine zusätzlichen Bauelemente erforderlich, oder jedenfalls nur einfachste analoge Schaltelemente beispielsweise ein Widerstandsnetz, das das Empfangssignal den Abtasteinheiten zuführt. Alternativ sind auch eigene Abtasteinheiten als separate Schaltungselemente möglich, die dann den Vorteil haben, dass ihre Spezifikation von derjenigen des digitalen Bausteins unabhängig ist, was besonders in sicherheitstechnischer Anwendung eine garantierbare Funktion der Hardware vereinfacht.

[0029] Zwischen Lichtempfänger und erster Abtasteinheit beziehungsweise zweiter Abtasteinheit ist vorzugsweise eine analoge Vorverarbeitungsschaltung mit einem Bipolarfilter zur Umwandlung des zunächst unipolaren Empfangssignals in ein bipolares Signal angeordnet. Die remittierten Lichtpulse bilden in dem Empfangssignal einen Peak und sind demnach unipolar, da Lichtsignale nicht negativ werden können. Das Bipolarfilter wandelt das unipolare Empfangssignal in ein bipolares Signal beispielsweise als eine Schwingung mit mindestens einem Maximum, einem Minimum und einem Nulldurchgang dazwischen. Als Bipolarfilter eignet sich insbesondere ein Bandpassfilter oder ein Differenzierer. Die Vorverarbeitungsschaltung kann zusätzlich einen Verstärker, insbesondere einen Transimpedanzverstärker, vor dem Bipolarfilter aufweisen.

[0030] Das erfindungsgemäße Verfahren kann auf ähnliche Weise weitergebildet werden und zeigt dabei ähnliche Vorteile. Derartige vorteilhafte Merkmale sind beispielhaft, aber nicht abschließend in den sich an die unabhängigen Ansprüche anschließenden Unteransprüchen beschrieben.

[0031] Die Erfindung wird nachstehend auch hinsichtlich weiterer Merkmale und Vorteile beispielhaft anhand von Ausführungsformen und unter Bezug auf die beigefügte Zeichnung näher erläutert. Die Abbildungen der Zeichnung zeigen in:

Fig. 1 ein Blockschaltbild eines entfernungsmessenden Sensors;

Fig. 2 ein Blockschaltbild eines Messkerns für die Signalverarbeitung in dem Sensor gemäß **Fig. 1**;

Fig. 3 ein Blockschaltbild für die zweifache Abtastung eines Empfangssignals mit hoher und niedriger Schwelle mit anschließender Selektion zu speichernder Abtastwerte;

Fig. 4 ein Blockschaltbild zur weiteren Erläuterung der Bestimmung einer Lichtlaufzeit mit zweifacher Abtastung gemäß **Fig. 3**;

Fig. 5 eine Darstellung der Wahrscheinlichkeit von Schwellenüberschreitungen für Rausch- und Nutzsignal zur Erläuterung der Reichweise des erfindungsgemäßen Verfahrens gegenüber herkömmlicher Abtastung; und

Fig. 6 eine Darstellung des Signal-Rauschverhältnisses in Abhängigkeit von der Schwelle.

[0032] **Fig. 1** zeigt ein Blockschaltbild eines entfernungsmessenden Sensors **10** in einer Ausführungsform als eindimensionaler optoelektronischer Entfernungstaster. Ein Lichtsender **12** ist so ausgerichtet,

dass sein Sendelicht einen Teilerspiegel **14** transmittiert und anschließend über eine Optik **16** in einen Überwachungsbereich **18** gelangt. Dort wird das Sendelicht, wenn sich ein Objekt **20** im Strahlengang befindet, daran reflektiert oder remittiert und kehrt erneut durch die Optik **16** zu dem Teilerspiegel **14** zurück, wo es in einem Lichtempfänger **22** gespiegelt und dort erfasst wird. Die koaxiale Teilerspiegelanordnung ist rein beispielhaft zu verstehen, die Erfindung umfasst ebenso andere Anordnungen ohne Teilerspiegel wie beispielsweise biaxiale Ausrichtung der optischen Achsen von Lichtsender **12** und Lichtempfänger **22** und einer Doppelaugenoptik. Auch die Erläuterung an einem eindimensionalen optoelektronischen Sensor ist nur exemplarisch zu verstehen, denn ebenso kann der Sensor **10** ein mehrdimensionales System sein, wie ein mehrstrahlige Taster, ein Lichtgitter oder ein Laserscanner, bei dem die Messrichtung beispielsweise mittels eines Drehspiegels oder eines drehbaren Abtastkopfes mit Lichtsender **12** und Lichtempfänger **22** periodisch variiert wird, so dass mit einem oder mehreren Scanstrahlen mindestens eine Überwachungsebene oder sogar ein Raumbereich abgetastet wird. Ein weiteres Beispiel für den Sensor **10** ist eine Lichtlaufzeitkamera mit ortsaufgelöstem Lichtempfänger **22**, der für seine einzelnen Pixel oder Gruppen davon jeweils einen Abstandswert bestimmt.

[0033] Ein Messkern **24** steuert den Lichtsender **12** an und wertet die Signale des Lichtempfängers **22** aus. Um für eine Abstandsmessung des Objekts **20** eine Lichtlaufzeit zu ermitteln, werden Lichtpulse ausgesandt und wieder empfangen, und die Differenz zwischen Sende- und Empfangszeitpunkt wird bestimmt. Diese Auswertung erfolgt aber nicht auf Basis nur eines einzigen Lichtpulses, sondern gemeinsamer Auswertung mehrerer Einzelmessungen mit jeweils einem ausgesandten und wieder empfangenen Lichtpuls, wobei die Lichtpulse insbesondere wegen eines einzuhaltenden Laserbudgets aufgrund von Augenschutzbetrachtungen relativ schwach sind. Ein weiterer Grund für die schwachen Laserpulse ist, dass diese preisgünstiger erzeugt werden können als starke Laserpulse, die Laserdioden sowie deren Ansteuerelektronik fallen dann einfacher und günstiger aus.

[0034] Fig. 2 zeigt ein Blockschaltbild des Messkerns **24**. In dem Sendepfad ist neben dem eigentlichen Lichtsender **12** noch eine Treiberschaltung **26** vorgesehen, während in dem Empfangspfad der Lichtempfänger **22** das Empfangssignal über einen analogen Vorverarbeiter **28** mit einem Vorverstärker **30** und einem Bipolarfilter **32**, eine erste Abtasteinheit **34** mit niedriger Schwelle und eine zweite Abtasteinheit **36** mit hoher Schwelle einem digitalen Baustein **38** mit der eigentlichen Steuerung und Auswertungseinheit **40** mit einem Speicher **42** zuführt. Der digitale Baustein **38** ist beispielhaft als FPGA bezeichnet, alternativ ist ein ASIC oder ein anderer digitaler Baustein möglich.

[0035] Mittels der Treiberschaltung **26** wird von dem Lichtsender **12** für eine von beispielsweise n= 10, ...100 oder mehr Einzelmessungen jeweils ein Lichtpuls ausgesandt. Die Sendepulse können zwischen den Einzelmessungen einen gezielten zeitlichen Jitter aufweisen, um so die Flanken zu verwaschen und insgesamt in an sich bekannter Weise eine höhere Zeitauflösung zu erreichen.

[0036] Der jeweilige ausgesandte Lichtpuls wird an dem Objekt **20** zurückgeworfen, und der Lichtempfänger **22** erzeugt aus dem remittierten Lichtpuls ein Empfangssignal. Der Lichtempfänger **22** ist als Photodiode oder APD ausgebildet, vorzugsweise als SPAD-Lichtempfänger und nochmals vorzugsweise nur mit einem summarischen, gemeinsamen Empfangssignal aller seiner SPAD-Zellen.

[0037] In dem analogen Vorverarbeiter **28** wird der Pegel des Empfangssignals zunächst von dem Vorverstärker **30** angehoben, etwa einem Transimpedanzverstärker. Das Bipolarfilter **32**, das beispielsweise ein Bandpassfilter oder ein Differenzierer sein kann, wandelt das unipolare Empfangssignal in ein bipolares Empfangssignal um. Die Empfangspulse des remittierten Lichtpulses werden also in Schwingungen mit mindestens einem negativen Nachschwinger umgesetzt. Der Vorverarbeiter **28** ist rein beispielhaft zu verstehen. Insbesondere sind andere Verstärker denkbar, die Reihenfolge von Vorverstärker **30** und Bipolarfilter **32** kann vertauscht werden, es kann ein Begrenzerverstärker ergänzt werden, auf das Bipolarfilter **32** verzichtet werden und dergleichen.

[0038] Das derart aufbereitete analoge Empfangssignal wird einmal von der ersten Abtasteinheit **34** mit einer niedrigen Schwelle und einmal von der zweiten Abtasteinheit **36** mit einer hohen Schwelle verglichen, wobei den Namen entsprechend die hohe Schwelle höher ist als die niedrige Schwelle und deren vorteilhafte genauere quantitative Auslegung noch erläutert wird. Die Abtasteinheiten **34**, **36** sind insbesondere als Komparatoren ausgebildet und können über Eingänge des digitalen Bausteins **38** beziehungsweise FPGA implementiert sein wie dargestellt oder alternativ als eigene Bausteine. Anstelle von Komparatoren können auch andere geeignete Schaltungselemente für einen Schwellenvergleich verwendet werden, etwa Limiter-Verstärker, die ohne DC-Offsetkorrektur gegen eine Vergleichsspannung messen. Prinzipiell ist auch statt nur einwertiger Abtastung mit einer einzigen niedrigen Schwelle in der ersten Abtasteinheit **34** eine Mehrschwellenabtastung für eine gewissen Amplitudenauflösung denkbar, vorzugsweise mit wenigen, geschickt gelegten zusätzlichen Schwellen wie in der einleitend genannten EP 2 942 644 B1 be-

schrieben. Dann sind auch die zusätzlichen Schwellen niedriger als die hohe Schwelle der zweiten Abtasteinheit **36**.

[0039] Die jeweiligen digitalen, vorzugsweise binarisierten Abtastwerte der beiden Abtasteinheiten **34**, **36** stehen nun der Steuer- und Auswertungseinheit **40** zur Verfügung, die nach den n Einzelmessungen einen Messwert für die Lichtlaufzeit und mit Hilfe der konstanten Lichtgeschwindigkeit unter Berücksichtigung des Rückwegs und möglicher Kalibrierungsanpassungen auf den Abstand zu dem Objekt **20** berechnet. Im Gegensatz zum herkömmlichen Vorgehen werden dafür nicht sämtliche Abtastwerte in dem Speicher **42** abgelegt oder dort in einem Histogramm gesammelt, sondern nur relevante Abtastwerte oder daraus abgeleitete Größen. Dabei entscheidet die Bewertung mit der hohen Schwelle in der zweiten Abtasteinheit **36**, welche Einzelmessungen oder Teilabschnitte davon als relevant angesehen werden.

[0040] Diese Erzeugung und Selektion der in dem Speicher **42** abzulegenden Daten wird nun unter Bezugnahme auf die **Fig. 3** und **Fig. 4** näher erläutert. **Fig. 3** zeigt dazu ein Blockschaltbild des Empfangspfades. Der analoge Vorverarbeiter **28** nach dem Lichtempfänger **22** ist hier vereinfachend nicht dargestellt. Die Verarbeitungsblocks nach der zweifachen Abtastung in der ersten Abtasteinheit **34** mit niedriger Schwelle und in der zweiten Abtasteinheit **36** mit hoher Schwelle sind Teil der Steuer- und Auswertungseinheit **40**.

[0041] Die erfindungsgemäße doppelte Abtastung mit hoher und niedriger Schwelle unterscheidet sich fundamental von einer 2-Bit-Abtastung. Es geht nicht darum, den Empfangspegel mit gegenüber einer Binarisierung höheren Amplitudenauflösung zu erfassen. Vielmehr hat der niedrige Kanal mit der ersten Abtasteinheit **34** eine ganz andere Funktion als der hohe Kanal mit der zweiten Abtasteinheit **36**.

[0042] Die hohe Schwelle ist so gewählt, dass sie nur selten vom Rauschen übertroffen wird. Beispielsweise liegt das Empfangssignal ohne den remittierten Lichtpuls nur zu 1% der Zeitpunkte oder sogar nur zu 0,1% der Zeitpunkte oder noch seltener oberhalb der hohen Schwelle. Die Abtastung mit der hohen Schwelle reagiert also fast nur auf Messereignisse und zudem selten, je nach spezifischer Auslegung, auf Rauschereignisse. Die niedrige Schwelle dagegen wird wie auch im Stand der Technik, etwa der einleitend genannten EP 1 972 961 A1, oft vom Rauschen erreicht, typischerweise zu 10% bis 50% der Zeitpunkte, oder auch noch häufiger bis zu 60%, 70%, 80% oder sogar 90% der Zeitpunkte. Es ist möglich, sich bei der Wahl der Schwellen an der Standardabweichung des Rauschens zu orientieren. Die niedrige Schwelle bleibt dann in einer 1-Sigma-Umgebung der Nulllage, die hohe Schwelle in einer n-Sigma-Umgebung vorzugsweise mit $n \geq 3$.

[0043] Wegen der Schwellenauslegung entstehen im hohen Kanal nur selten Abtastwerte ungleich Null. Es wäre denkbar, die von der zweiten Abtasteinheit **36** erzeugten Abtastwerte und damit das mit der hohen Schwelle binarisierte Empfangssignal als Ganzes zu speichern, aber dann wäre im Hinblick auf den Speicherbedarf gegenüber dem herkömmlichen Vorgehen nichts gewonnen. Eine gewisse Ersparnis würde es bieten, die Abtastwerte nur dann zu speichern, wenn in der betreffenden Einzelmessung die hohe Schwelle mindestens einmal übertroffen war. Am meisten Speicher wird jedoch gespart, wenn nur Zeitstempel von Schwellenübergängen gespeichert werden. Das bildet das Verhalten eines TDC nach. Es fallen daher in bevorzugter Ausführungsform in einem Block **44** nur wenige Zeitstempel an, nämlich für ausgeprägte Empfangspulse von remittierten Lichtpulsen, also die zu detektierenden Messereignisse, und für seltene hohe Rauschausschläge. Diese Speicherung als Zeitstempel ist anlog zu dünn besetzten Matrizen in komprimierter Form (CSR, „compressed sparse row“ format).

[0044] Im niedrigen Kanal liefert die erste Abtasteinheit **34** eine Bitfolge mit recht vielen Einsen entsprechend den 10%-50% Zeitpunkten, zu denen das Empfangssignal stärker ist als die niedrige Schwelle. Diese in einem Block **46** zunächst entstehenden Abtastwerte lassen sich folglich nicht sinnvoll als Zeitstempel komprimieren, da Schwellenübergänge kein seltenes Ereignis sind.

[0045] Um die angestrebten kleinen Datenmengen zu erreichen, die im dem Speicher **42** abgelegt werden, erfolgt eine Selektion aus dem hohen Kanal: Es werden in einem Block **48** nur diejenigen Abtastwerte behalten, die zu Einzelmessungen mit mindestens einer Schwellüberschreitung im hohen Kanal gehören, oder noch bevorzugter nur Abtastwerte in einer zeitlichen Umgebung einer Schwellüberschreitung im hohen Kanal. Der hohe Kanal dient folglich als Detektor für Messereignisse, und es werden auch im niedrigen Kanal nur Abtastwerte eines so erkannten Messereignisses behalten. Sonstige Abtastwerte werden als rauschbedingt angesehen und verworfen. Die große Datenmenge der vielen Abtastwerte in dem Block **46** fällt also tatsächlich nicht an, denn dies wird nicht gespeichert, sondern allenfalls innerhalb einer Einzelmessung vorübergehend zwischengepuffert, um zeitliche Umgebungen auch vor einem Schwellenübergang im hohen Kanal in den Speicher **42** übertragen beziehungsweise dort festhalten zu können.

[0046] Nach der zweifachen Abtastung und Selektion stehen damit in dem Speicher **42** zu den Einzelmessungen einerseits wenige Zeitstempel aus dem hohen Kanal und andererseits wenige dazu passen-

de Abtastwerte aus dem niedrigen Kanal für die weitere Auswertung **50** zur Verfügung. Es wäre grundsätzlich denkbar, nur die Daten eines der Kanäle in der weiteren Auswertung **50** zu berücksichtigen. Sind das die wenigen Abtastwerte des niedrigen Kanals, so hat der hohe Kanal ausschließlich als Selektor gewirkt, um die Daten des niedrigen Kanals auf die interessanten Zeitbereiche zu reduzieren. Sind es umgekehrt allein die wenigen Zeitstempel des hohen Kanals, so wird der niedrige Kanal effektiv nicht genutzt. Eine solche einfache Abtastung mit nur der einen hohen Schwelle kann prinzipiell funktionieren, entspricht aber nicht dem erfindungsgemäßen Vorgehen.

[0047] **Fig. 4** zeigt ein weiteres Blockschaltbild, um insbesondere die weitere Auswertung **50** näher zu erläutern. Die anhand der **Fig. 3** beschriebene zweifache Abtastung und Selektion ist hier in **Fig. 4** nur zusammenfassend als jeweils ein Block **36**, **44** für den hohen Kanal und ein Block **34**, **46**, **48** für den niedrigen Kanal gezeigt.

[0048] Aus den Zeitstempeln, die der hohe Kanal erzeugt, wird in einem Block **52** eine Lichtlaufzeit bestimmt. Im Grunde ist jeder Zeitstempel nach Abzug des ebenfalls bekannten zugehörigen Sendezeitpunkts direkt ein Einzelmesswert der Lichtlaufzeit, und es kann der Mittelwert dieser Einzelmesswerte gebildet werden. Weitere Maßnahmen, wie die Kompensation interner Signalwege etwa mittels Referenzmessung oder ein Ausfiltern von singulär gelegenen Zeitstempeln, die eher einem Rauschereignis zuzuordnen sind, oder die Berücksichtigung der bekannten Sendepulsform sind denkbar. Diese oder eine andere statistische Bestimmung der Lichtlaufzeit aus den Zeitstempeln der n Einzelmessungen liefert in einem Block **54** einen Messwert für die Lichtlaufzeit und, mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit, auch für den Objektabstand.

[0049] Aus den Abtastwerten des niedrigen Kanals lässt sich in einem Block **56** ebenfalls die Lichtlaufzeit bestimmen. Dazu können insbesondere die Abtastwerte auf den jeweils zugehörigen Sendezeitpunkt ausgerichtet und so addiert werden, und anschließend wird die sich durch die Addition herausbildende Signatur des remittierten Lichtpulses als Empfangszeitpunkt zeitlich lokalisiert. Die beiden in den Blocks **52**, **56** bestimmten Lichtlaufzeiten werden dann miteinander verrechnet oder gegenseitig plausibilisiert. Alternativ wird die Lichtlaufzeit nur im hohen Kanal im Block **52** oder nur im niedrigen Kanal im Block **56** bestimmt, oder die Zeitstempel des hohen Kanals und die Abtastwerte des niedrigen Kanals werden gemeinsam im Hinblick auf eine Lichtlaufzeit statistisch ausgewertet.

[0050] In dem niedrigen Kanal wird außerdem vorzugsweise in einem Block **58** auch die Intensität des Empfangssignals bewertet. Diese Intensitätsinformation wird wiederum genutzt, um eine Helligkeits- oder Schwarz-Weiß-Korrektur der Lichtlaufzeit beispielsweise mit einer Korrekturtabelle vorzunehmen. Ohne eine derartige Korrektur weißt der gemessene Abstandswert einen intensitätsabhängigen Fehler auf.

[0051] Nur die Abtastwerte im niedrigen Kanal bieten noch genug Messinformation, um die Intensität präzise zu bestimmen. Es ist zwar möglich, im hohen Kanal auch Zeitstempel der Schwellenübergänge nach unten hin zu speichern und so anhand der Zeitdifferenz zwischen Schwellüberschreitung und nachfolgender Schwellunterschreitung die Breite des Empfangspulses zu schätzen. Das ist aber gegenüber der Intensitätsmessung in Block **58** im niedrigen Kanal zu ungenau, erst recht in Anbetracht der Tatsache, dass die hohe Schwelle auch einen Großteil eines Messpulses abschneidet und der überstehende Teil die Pulsform nur unzureichend repräsentiert.

[0052] In einer bevorzugten Ausführungsform werden der hohe Kanal für die Lichtlaufzeitmessung und der niedrige Kanal für die Intensitätsmessung und anschließende Helligkeitskorrektur der Lichtlaufzeit verwendet. Der Block **56** entfällt dann.

[0053] Als weitere bevorzugte Ausführungsform kann in dem hohen Kanal zusätzlich ein analoges Filter **60** zwischen Lichtempfänger **22** und zweiter Abtasteinheit **36** angeordnet sein, insbesondere ein Bandpassfilter für die Passbandbreite, die der Pulsbreite des Lichtpulses entspricht. Damit wird die Sensitivität des hohen Kanals für Messereignisse verbessert. Zugleich werden aber von dem Filter **60** intensitätsabhängige Verzögerungen und damit Laufzeitfehler verursacht. Der niedrige Kanal weist kein solches Filter auf, so dass hieraus die zusätzlichen Laufzeitfehler des hohen Kanals korrigiert werden können. Somit werden die Vorteile einer höheren Selektivität durch das Filter **60** erzielt und zugleich dessen Nachteile aus dem niedrigen Kanal kompensiert. Eine dem analogen Filter **60** entsprechende Nachbearbeitung ist auch in dem niedrigen Kanal denkbar, jedoch erst im digitalen Teil hinter der ersten Abtasteinheit **34** etwa mittels eines FIR-Filters. Eine entsprechende Glättung kann auch vor dem Ablegen in dem Speicher **42** erfolgen, indem Abschnitte des binarisierten Empfangssignals geglättet werden, etwa mit einem Box-Filter der Pulslänge, und anschließend unterabgetastet werden.

[0054] Es gibt zahlreiche Varianten, welche Daten nach der beschriebenen Selektion aus dem hohen Kanal in dem Speicher **42** abgelegt werden. Bisher wurde eine vorteilhafte Ausführungsform beschrieben, in der Zeitstempel von Schwellenübergängen aus dem hohen Kanal und damit zeitlich korrelierende Abtastwerte aus dem niedrigen Kanal gespeichert werden. Es sei nochmals betont, dass dies auch

Schwellenübergänge in beide Richtungen sein können, also steigende und fallende Flanken des Empfangssignals an der hohen Schwelle. Grundsätzlich können auch aus dem niedrigen Kanal Zeitstempel von Schwellenübergängen statt der Abtastwerte gespeichert werden, aber damit wird regelmäßig wegen zu häufiger Schwellenübergänge kein Speicherplatz eingespart.

[0055] Vorzugsweise werden, auch wenn das denkbar ist, nicht alle Abtastwerte der gesamten Einzelmessung aus dem niedrigen Kanal gespeichert, wenn in derselben Einzelmessung die hohe Schwelle mindestens einmal übertroffen ist. Vielmehr ist es vorteilhaft, nur Abtastwerte des niedrigen Kanals in einer zeitlichen Umgebung des Schwellenübergangs in dem hohen Kanal abzuspeichern. Die Umgebung orientiert sich vorzugsweise an der Pulsdauer und beträgt k*Pulsbreite mit k=1..5. Nach den n Einzelmessungen liegen dann in dem Speicher die Abtastwerte des niedrigen Kanals in der Umgebung aller bezüglich der hohen Schwelle signifikanten Ereignisse, also der Messereignisse und der seltenen verbleibenden Rauschereignisse, die auch die hohe Schwelle noch übertreffen.

[0056] Es ist ferner denkbar, nur Speicher **42** für eine begrenzte Anzahl, beispielsweise m=5... **10**, von Abtastwerten von Einzelmessungen oder zeitlichen Umgebungen eines Ereignisses bereitzustellen. Darin werden rollierend jeweils die Einzelmessungen beziehungsweise Umgebungen gespeichert, die aktuell den signifikantesten Ereignissen im hohen Kanal entsprechen, etwa mit den meisten Schwellüberschreitungen im hohen Kanal oder mit dem größten Abstand zwischen einer steigenden und nachfolgenden fallenden Flanke.

[0057] Anstelle der Abtastwerte selbst können auch nur summarische Kenngrößen gespeichert werden, etwa ein Mittelwert oder eine Varianz. Das gilt für beide Kanäle. Aus solchen Kenngrößen lässt sich mit geeigneter Modellierung der Empfangszeitpunkt rekonstruieren.

[0058] Als Maß für die Intensität kann der zeitliche Abstand zwischen der steigenden und fallenden Flanke eines Pulses genutzt werden, oder bei Verwendung eines Bipolarfilters **32** auch eines nachfolgenden Unterschwingers. Bei aufaddierten Abtastwerten kann auch direkt das Integral in Form der Summe der Abtastwerte über das entsprechende Zeitintervall als Maß der Intensität bestimmt werden. Diese Intensitätsmessung ist im niedrigen Kanal genauer, kann aber auch zumindest ergänzend im hohen Kanal erfolgen.

[0059] Die niedrige Schwelle und die hohe Schwelle können parametriert oder eingelernt werden, indem Empfangssignale insbesondere bei inaktivem Lichtsender **12** geeignet ausgewertet werden. Bei einem SPAD-Lichtempfänger mit Strombegrenzung kann die hohe Schwelle schon im Design aus dem maximal möglichen Schrotrauschen entsprechend dem höchsten noch zugelassenen DC-Strom und dem kleinsten Signal aus einer Grenzreichweite des Sensors **10** berechnet werden. Es ist auch möglich, zumindest die hohe Schwelle dynamisch anzupassen. Das ist einmal innerhalb einer Einzelmessung denkbar, denn remittierte Lichtpulse stammen anfangs aus dem Nahbereich und später aus dem Fernbereich, so dass die hohe Schwelle entsprechend abgesenkt werden kann, um den entfernungsbedingten Signalverlust wenigstens teilweise auszugleichen. Andererseits ist eine Anpassung an einen bereits gemessenen Objektabstand oder eine bereits gemessene Intensität denkbar, oder es werden entsprechende Erwartungen aufgestellt, und die hohe Schwelle wird daran angepasst.

[0060] Eine Form der dynamischen Anpassung ist, nach dem Überschreiten der hohen Schwelle direkt folgende Überschreitungen zu ignorieren. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten wie das Heraufsetzen der hohen Schwelle oder das Herabsetzen der Empfindlichkeit des Lichtempfängers **12**. Dadurch wird verhindert, dass derselbe Empfangspuls wiederholt berücksichtigt wird und beispielsweise mehrere direkt aufeinanderfolgende Zeitstempel gespeichert werden. Bei einem SPAD-Lichtempfänger **12** könnte dies so aussehen, dass die SPAD-Zellen unmittelbar nach einem Schwellenübergang über die hohe Schwelle inaktiv geschaltet werden. Das ist beispielsweise durch Absenken der Vorspannung unter die Durchbruchspannung möglich und verhindert zusätzlich noch, dass sehr viele oder alle SPAD-Zellen durch denselben remittierten Lichtpuls auslösen und in ihre Totzeit gehen. Werden sie erst nach einer kurzen Zeit etwa entsprechend einer Pulsbreite wieder aktiv geschaltet, so ist der Lichtempfänger auch für zusätzliche, fernere Ziele noch verfügbar, und der Sensor **10** ist mehrecho- oder mehrzielfähig. Mehrere Ziele treten zum Beispiel bei teiltransparenten Objekten **20**, Kantentreffen und Nebel auf.

[0061] Die zweite Abtasteinheit **36** bildet wie erläutert praktisch einen TDC nach. Anstelle einer Implementierung mittels Komparatoren an FPGA-Eingängen wie erläutert sind auch Carry-Chain Implementierungen in dem FPGA, diskrete oder in ASIC realisierte TDC-Bauteile möglich. Diskrete TDCs können Multi-Hit-TDCs sein, oder Single-Hit-TDCs mit vorgeschaltetem Bauteil zur Verteilung der einkommenden Ereignisse.

[0062] **Fig. 5** ist eine schematische Darstellung der Wahrscheinlichkeit von Schwellenüberschreitungen für ein Rausch- und ein Nutzsignal. Anhand dieser Darstellung soll erklärt werden, warum die scharfe Selektion durch die hohe Schwelle die Empfindlich-

keit des Sensors **10** und damit dessen Reichweite überraschend wenig beeinträchtigt.

[0063] Gezeigt ist in **Fig. 5** einerseits mit durchgezogener Linie die Wahrscheinlichkeitsverteilung für einen um Null zentrierten, normalverteilten Rauschstrom mit Standardabweichung σ=N und andererseits mit gestrichelter Linie die entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung für einen Signalstrom während eines Empfangspulses bei gleicher Standardabweichung. Für eine gegebene Schwelle **62** entspricht nun die Fläche rechts dieser Schwelle **62**, einmal schwarz für den Rauschstrom und einmal grau für den Signalstrom, den Wahrscheinlichkeiten $\mathbf{p_R}$ und $\mathbf{p_S}$, dass die Schwelle **62** in einem Zeitintervall dt übertroffen ist.

[0064] Aus diesen beiden Wahrscheinlichkeiten kann nun das Signal-Rauschverhältnis für ein Histogramm berechnet werden, das sich aus den kumulierten, mit der Schwelle **62** binarisierten Empfangssignalen aus n Einzelmessungen zusammensetzt. Dabei muss sichergestellt werden, dass in einigen Einzelmessungen mindestens einmal die Schwelle **62** übertroffen ist, denn sonst gibt es trotz guten Signal-Rausch-Verhältnisses keine gespeicherten Daten.

[0065] **Fig. 6** zeigt dieses Signal-Rauschverhältnis für ein Histogramm auf der **Y**-Achse in Abhängigkeit von einer nun variabel angenommenen Schwelle **62** auf der **X**-Achse. Gegenüber einem Anfangswert bei einer Nullschwelle verbessert sich das Signal-Rausch-Verhältnis mit steigender Schwelle **62** zunächst, weil $\mathbf{p_R}$ deutlich schneller sinkt als $\mathbf{p_S}$. Das geht aber nur bis zu einem Maximum, für eine weiter steigende Schwelle **62** sinkt nun $\mathbf{p_S}$ überkompensierend schnell, so dass bei einem gewissen Wert der Schwelle **62**, im Beispiel bei 3,3 N, das Signal-Rauschverhalten wieder dasselbe ist wie bei der Nullschwelle. Es müssen aber bei der höheren Schwelle nur deutlich weniger Ereignisse detektiert werden, denn bei 3,3 N gibt es nur noch $4{,}5*10^{-4}$ Rauschereignisse pro dt (siehe nachfolgendes Zahlenbeispiel), die Datenrate wurde daher ganz erheblich reduziert.

[0066] Abschließend soll noch ein Zahlenbeispiel gegeben werden, wie stark der Speicherbedarf erfindungsgemäß reduziert werden kann. Angenommen sei eine Pulsdauer t_{puls}=1,5 ns, ein Zeitschritt dt=15 ps, eine Anzahl n=60 von Einzelmessungen und eine Messreichweite von 15 m entsprechend einem Zeitintervall für Lichtlaufzeiten von T=100 ns pro Einzelmessung. Die Signalamplitude an einem hier beispielhaft betrachteten SPAD-Lichtdetektor betrage S=1,2 N, wobei N die Standardabweichung des Rauschens ist.

[0067] Herkömmlich würde mit einer Schwelle gemessen, die dem Mittelwert des Rauschens entspricht. Bei Einsatz eines Bipolarfilters **32** ist das eine Nullschwelle. Die Auslösewahrscheinlichkeit $\mathbf{p_R}$ durch das Rauschen liegt je Zeitschritt dt bei 0,5, die Auslösewahrscheinlichkeit $\mathbf{p_S}$ durch den Signalstrom während eines Empfangspulses bei 0,88. Es resultiert ein Signal-Rauschverhältnis von 6 für ein Histogramm entsprechend den Erläuterungen zu **Fig. 6**, und gespeichert werden müssen 6667 Bit pro Einzelmessung, nämlich T/dt. Sollen die Daten nicht direkt als Histogramm kumuliert werden, sondern einzelnen Daten im Speicher **42** verfügbar sein, so multipliziert sich das noch mit n. Bei Akkumulation in einem Histogramm multipliziert sich der Speicherbedarf stattdessen mit $\log_2(n)$.

[0068] Erfindungsgemäß sei die hohe Schwelle bei 3,3*N gewählt, die niedrige Schwelle so wie die herkömmliche Schwelle beim Mittelwert des Rauschens beziehungsweise als Nullschwelle. Es werden fünf Zeitstempel pro Einzelmessung gespeichert. Das genügt im Allgemeinem, da die hohe Schwelle nur sehr selten übertroffen wird. Die Auslösewahrscheinlichkeit durch den Rauschstrom je Zeitschritt dt liegt bei $\mathbf{p_R} = 4.5 * 10^{-4}$ entsprechend der Wahrscheinlichkeit, dass in einer Normalverteilung ein Ereignis um mehr als 3,3 Standardabweichungen nach oben ausbricht, wie in **Fig. 5** gezeigt. Die Auslösewahrscheinlichkeit des Signalstroms S=1,2 N ist entsprechend höher, hier genügt bereits ein Ausbrechen um 3,3-1,2=2, 1 Standardabweichungen, es ist p_S=0,017. Quantitativ beträgt die Standardabweichung der Binomialverteilung $\sigma_N=(n*p_R*(1-\mathbf{p_R}))1/2 = 0.16$ und damit liegt das Signal-Rauschverhältnis eines angenommenen, da erfindungsgemäß ja nicht aufgezeichneten Histogramms entsprechend **Fig. 6** bei $n*(p_S-p_R)/\sigma_N \approx 6$. Diese Übereinstimmung des Signal-Rauschverhältnisses bei herkömmlicher niedriger und erfindungsgemäßer hoher Schwelle war natürlich nach der Diskussion zu **Fig. 6** zu erwarten. Wenn man nun noch die vorteilhafte Ausführungsform heranzieht, in der insgesamt über alle Einzelmessungen Abtastwerte des niedrigen Kanals nur für fünf Umgebungen beispielsweise der Länge $2*t_{Puls}$ zu den fünf signifikantesten Ereignissen im hohen Kanal abgespeichert werden, so besteht ein Speicherbedarf von nur 1000 Bit = $5* 2 * t_{Puls}/dt$.

[0069] Auch wenn dies nur ein Zahlenbeispiel ist, wird die Einsparung von Speicherbedarf dadurch deutlich. Der hohe Kanal selektiert die relevanten Ereignisse für den niedrigen Kanal. Aus dem hohen Kanal müssen lediglich die wenigen Zeitstempel der dort erfassten Ereignisse gespeichert werden, womit der Aufwand nicht mehr linear, sondern nur noch logarithmisch mit der Anzahl n der Einzelmessungen anwächst, und aus dem niedrigen Kanal können gezielt die gespeicherten Abtastwerte auf enge zeitliche Umgebungen dazu reduziert werden.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- EP 1972961 A2 [0005]
- EP 2942644 B1 [0007, 0038]
- EP 3185038 A1 [0010, 0011]
- US 2012162632 A1 [0011]
- EP 1972961 A1 [0042]

Patentansprüche

1. Optoelektronischer Sensor (10) zur Erfassung und Abstandsbestimmung eines Objekts (20) in einem Überwachungsbereich (18) mit einem Lichtsender (12) zum wiederholten Aussenden von Lichtpulsen für jeweils eine Einzelmessung, einem Lichtempfänger (22) zum Erzeugen eines Empfangssignals aus einem von dem Objekt (20) remittierten Lichtpuls, einer ersten Abtasteinheit (34) zum Abtasten des Empfangssignals mit einer niedrigen Schwelle und einer zweiten Abtasteinheit (36) zum Abtasten des Empfangssignals mit einer hohen Schwelle, einem Speicher (42) zum Ablegen von Abtastwerten der ersten Abtasteinheit (34) und/oder der zweiten Abtasteinheit (36) oder daraus abgeleiteter Größen und einer Steuer- und Auswertungseinheit (38, 40), die dafür ausgebildet ist, nach mehreren Einzelmessungen mit Hilfe der in dem Speicher (42) abgelegten Daten einen Messwert für die Lichtlaufzeit von dem Sensor (10) zu dem Objekt (20) zu bestimmen, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuer- und Auswertungseinheit (38, 40) weiterhin dafür ausgebildet ist, Abtastwerte der ersten Abtasteinheit (34) oder daraus abgeleitete Größen nur dann in dem Speicher (42) abzulegen, wenn die zweite Abtasteinheit (36) für dieselbe Einzelmessung ein Überschreiten der hohen Schwelle feststellt.

2. Sensor (10) nach Anspruch 1, wobei die niedrige Schwelle so gewählt ist, dass das Empfangssignal zu 10% - 80% der Zeit oberhalb liegt und/oder die hohe Schwelle so gewählt ist, dass das Empfangssignal zu höchstens 1% der Zeit oberhalb liegt.

3. Sensor (10) nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Steuer- und Auswertungseinheit (38, 40) dafür ausgebildet ist, die hohe Schwelle dynamisch anzupassen, insbesondere innerhalb einer Einzelmessung in Abhängigkeit von der Entfernung, die der ausgesandte Lichtpuls bereits zurückgelegt hat, von einem Abstand des Objekts (20) und/oder von einer Remission des Objekts (20).

4. Sensor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Steuer- und Auswertungseinheit (38, 40) dafür ausgebildet ist, einen Zeitpunkt zu speichern, zu dem die zweite Abtasteinheit (36) einen Schwellenübergang des Empfangssignals bezüglich der hohen Schwelle feststellt.

5. Sensor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Steuer- und Auswertungseinheit (38, 40) dafür ausgebildet ist, Abtastwerte der ersten Abtasteinheit (34) oder daraus abgeleitete Größen nur in einer zeitlichen Umgebung eines von der zweiten Abtasteinheit (36) festgestellten Schwellenübergangs zu speichern.

6. Sensor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Steuer- und Auswertungseinheit (38, 40) dafür ausgebildet ist, Abtastwerte der ersten Abtasteinheit (34) oder daraus abgeleitete Größen nur für eine vorgegebene Anzahl von Einzelmessungen zu speichern, insbesondere für diejenigen Einzelmessungen mit den meisten Überschreitungen der hohen Schwelle in der zweiten Abtasteinheit (36).

7. Sensor (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Steuer- und Auswertungseinheit (38, 40) dafür ausgebildet ist, anstelle von Abtastwerten nur summarische Kennwerte abzuspeichern, insbesondere einen Mittelwert von Abtastwerten.

8. Sensor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zwischen Lichtempfänger (22) und zweiter Abtasteinheit (36) ein analoges, auf eine Pulslänge der Lichtpulse abgestimmtes Filter (60) angeordnet ist.

9. Sensor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Steuer- und Auswertungseinheit (38, 40) dafür ausgebildet ist, aus Abtastwerten der ersten Abtasteinheit (34) oder daraus abgeleiteten Größen eine Intensität des remittierten Lichtpulses zu bestimmen.

10. Sensor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Lichtempfänger (22) eine Vielzahl von SPAD-Lichtempfangselementen aufweist, die ein gemeinsames Empfangssignal erzeugen.

11. Sensor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Steuer- und Auswertungseinheit (38, 40) dafür ausgebildet ist, nach Überschreiten der hohen Schwelle in der zweiten Abtasteinheit (36) für ein Zeitintervall weitere Überschreitungen der hohen Schwelle zu ignorieren.

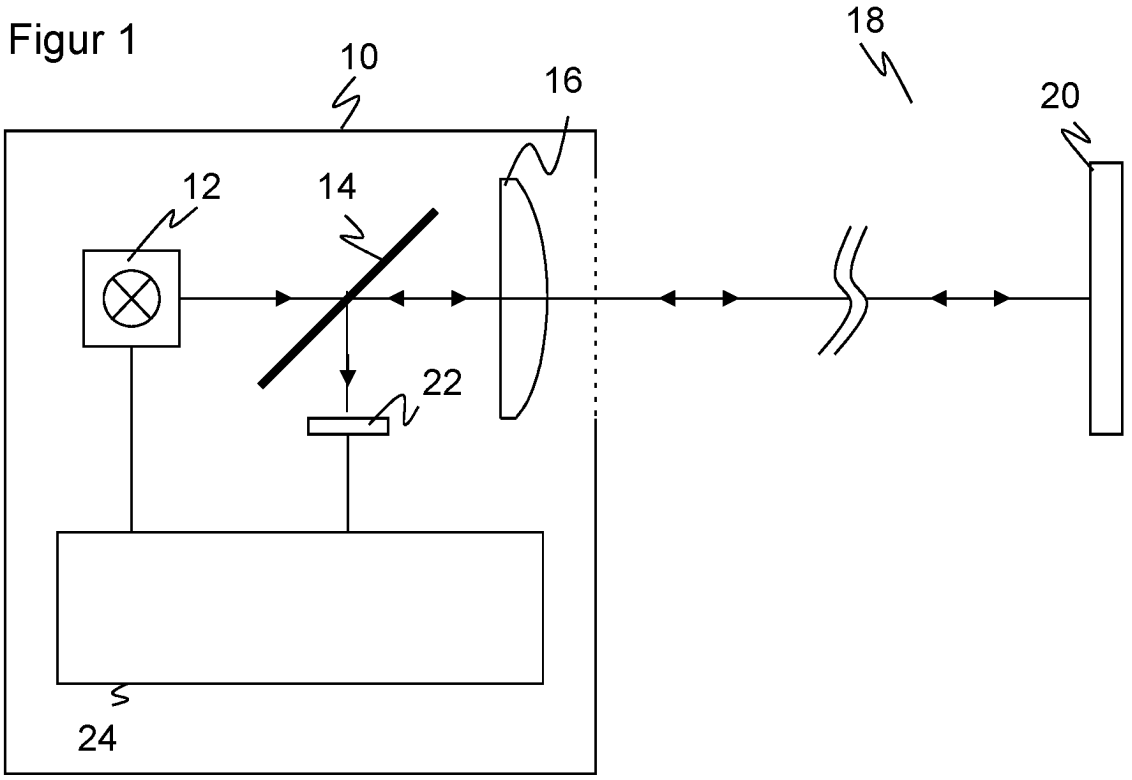
12. Verfahren zur Erfassung und Abstandsbestimmung eines Objekts (20) in einem Überwachungsbereich (18), bei dem wiederholt Lichtpulse für jeweils eine Einzelmessung ausgesandt werden, aus einem von dem Objekt (20) remittierten Lichtpuls ein Empfangssignal erzeugt und das Empfangssignal in einer ersten Abtastung (34) mit einer hohen Schwelle und in einer zweiten Abtastung (36) mit einer niedrigen Schwelle abgetastet wird, Abtastwerte der ersten und/oder zweiten Abtastung (34, 36) oder daraus abgeleitete Größen gespeichert werden und nach mehreren Einzelmessungen mit Hilfe gespeicherten Daten ein Messwert für die Lichtlaufzeit zu dem Objekt (20) bestimmt wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass Abtastwerte der ersten Abtastung (34) oder daraus abgeleitete Größen nur dann gespeichert werden, wenn mit der zweite Abtastung (36) für dieselbe

Einzelmessung ein Überschreiten der hohen Schwelle feststellt wird.

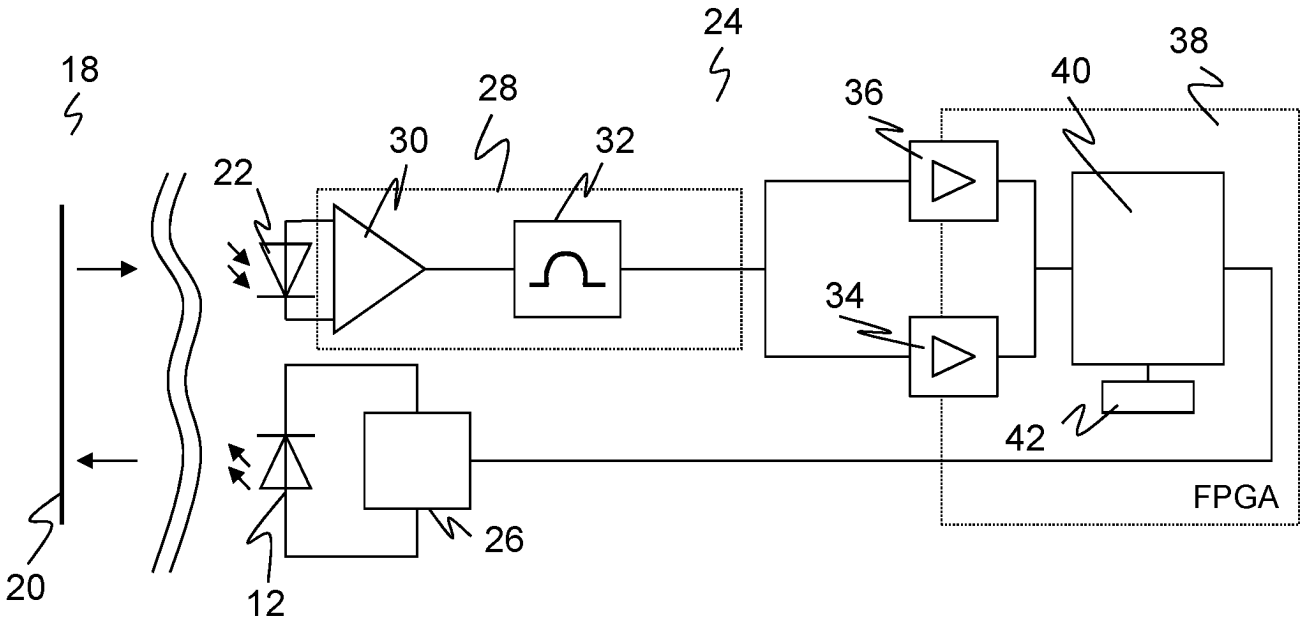
Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

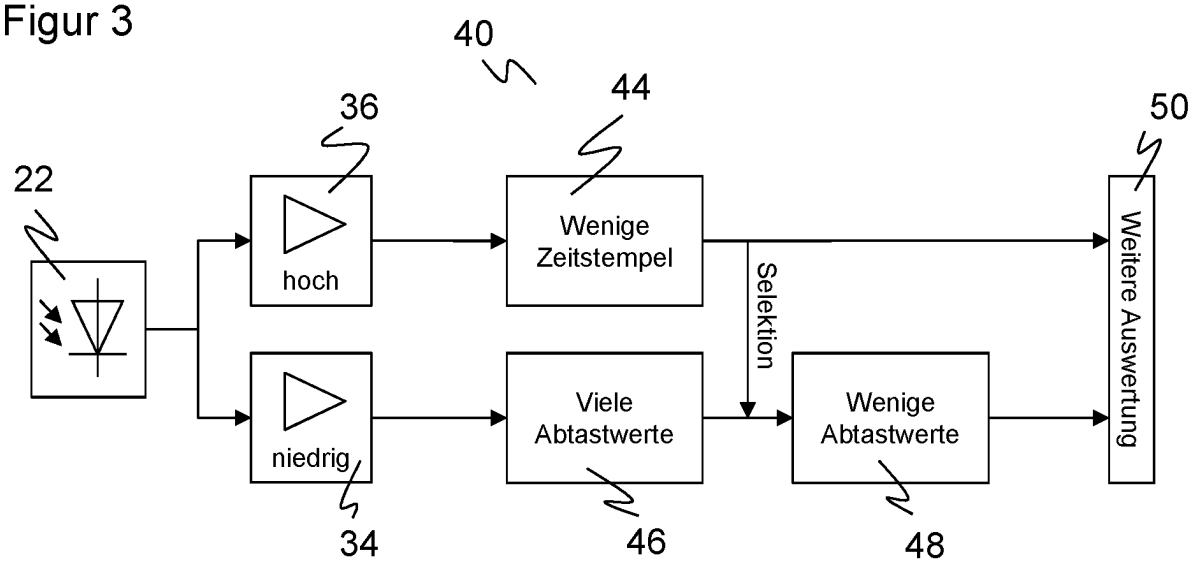
Figur 1



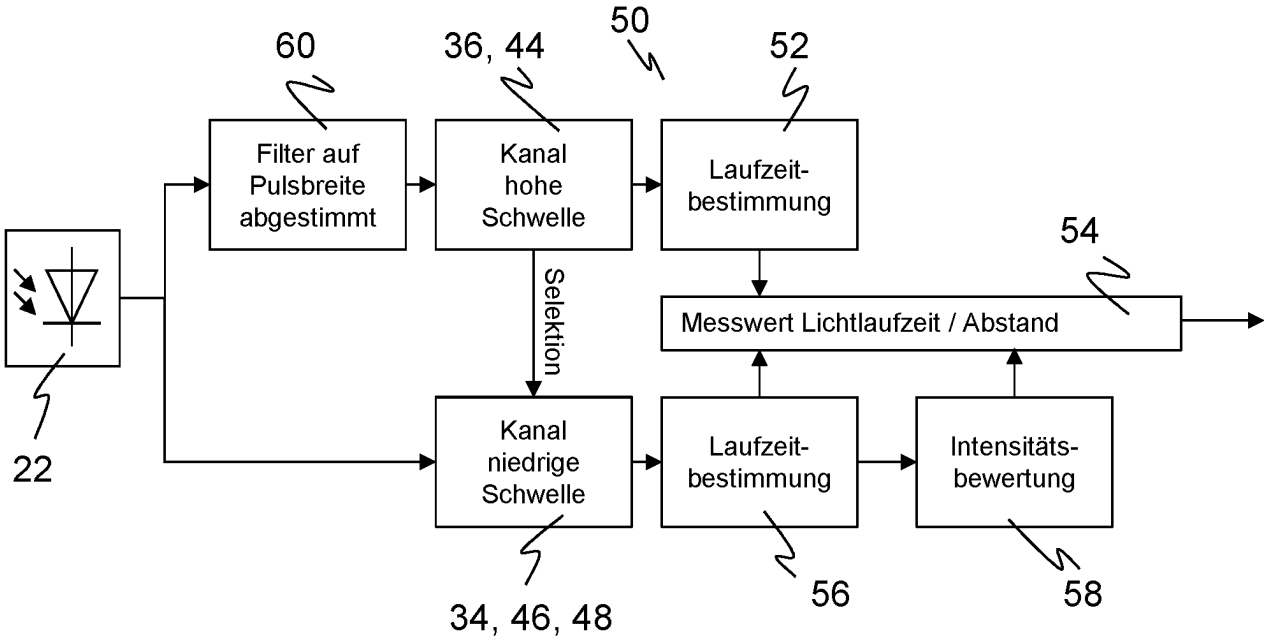
Figur 2



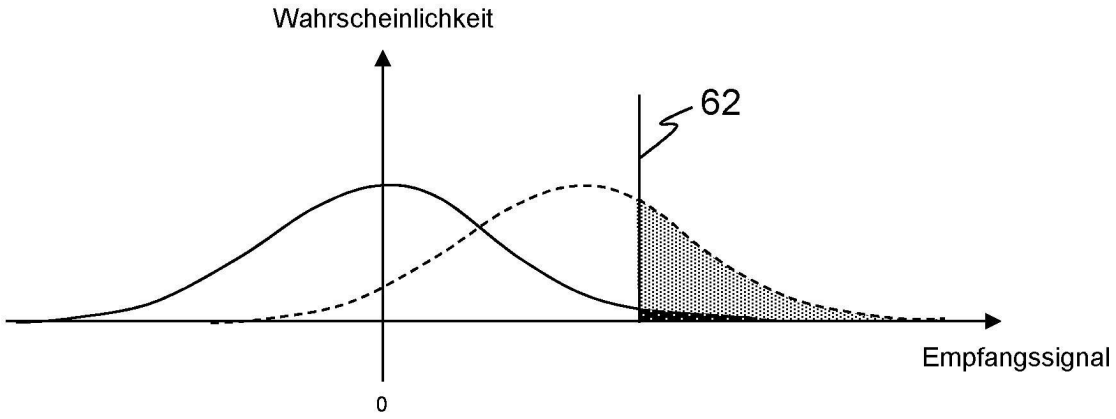
Figur 3



Figur 4



Figur 5



Figur 6

