

(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
11. Juni 2020 (11.06.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2020/114769 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:

G01S 7/481 (2006.01) G01S 7/486 (2020.01)
G01S 7/4861 (2020.01) G01S 7/487 (2006.01)
G01S 7/4865 (2020.01) G01S 17/10 (2020.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2019/081885

(22) Internationales Anmeldedatum:
20. November 2019 (20.11.2019)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2018 220 932.4
04. Dezember 2018 (04.12.2018) DE

(71) Anmelder: **OSRAM GMBH** [DE/DE]; Marcel-Breu-
er-Straße 6, 80807 München (DE).

(72) Erfinder: **ESCHEY, Michael**; Am Hofacker 16, 86517
Wehringen (DE). **FERREIRA, Ricardo**; Putzbrunnerstr.
114a, 85521 Ottobrunn (DE). **GIANNANTONIO-TILL-
MANN, Jannis**; Geltinger Straße 49, 85570 Markt Schwa-
ben (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN,
KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO,
NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW,
SA, 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.

(54) Title: METHOD FOR DETERMINING THE DISTANCE AND REFLECTIVITY OF AN OBJECT SURFACE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM BESTIMMEN DES ABSTANDS UND RÜCKSTRAHLVERMÖGENS EINER
OBJEKTOBERFLÄCHE

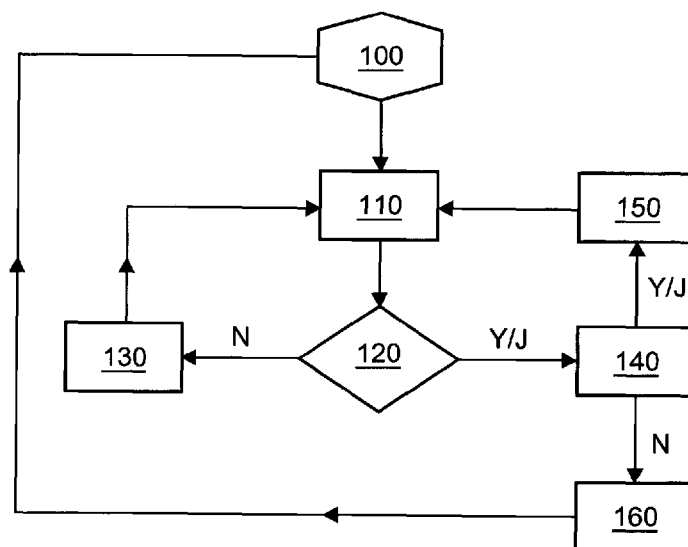


FIG. 11

(57) Abstract: A method for determining a distance (d) and a reflectivity of an object surface (14) using a laser source (10) that emits light (12) at a certain power and using a detector (16) that detects a level of irradiance of light (18) reflected by or scattered back from the object surface (14) and that outputs a time-dependent voltage signal on the basis thereof comprises: setting (100, 110, 220, 230, 240) the laser source (10) so that the latter emits light (12) at a specified first value of power in at least one pulse, setting (100, 110) the detector (16) so that the latter outputs a first voltage signal with a specified second value for a gain factor on the basis of the level of irradiance of the detected reflected or back-scattered light (18), determining (120, 260) a first value for the distance of the object surface (14) from a measured light time-of-flight (ToF) assigned to the first voltage signal, adapting (130, 150, 220) the first value of the power of the laser source (10) and/or the second value of the gain factor of the detector (16) on the basis of the determined first value for the distance (d), emitting (110, 240) light (12) again using the laser source (10) and detecting the reflected or back-scattered light (18) by the detector (16) and outputting a corresponding second voltage signal using the adapted first and/or second value, determining (120, 260) a second value for the distance (d) of the object surface from a measured light time-of-flight (ToF) assigned to the second voltage signal.



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

Veröffentlicht:

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

(57) **Zusammenfassung:** Ein Verfahren zum Bestimmen eines Abstands (d) und Rückstrahlvermögens einer Objektoberfläche (14) unter Verwendung einer Licht (12) mit einer Leistung emittierenden Laserquelle (10) und eines Detektors (16), der das von der Objektoberfläche (14) reflektierte oder zurückgestreute Licht (18) mit einer Bestrahlungsstärke erfasst und abhängig davon ein zeitabhängiges Spannungssignal ausgibt, umfasst: Einstellen (100, 110, 220, 230, 240) der Laserquelle (10), so dass dieser in wenigstens einem Puls Licht (12) mit einem vorbestimmten ersten Wert der Leistung emittiert, Einstellen (100, 110) des Detektors (16), so dass dieser abhängig von der Bestrahlungsstärke des erfassten, reflektierten oder zurückgestreuten Lichts (18) ein erstes Spannungssignal mit einem vorbestimmten zweiten Wert für einen Verstärkungsfaktor ausgibt, Bestimmen (120, 260) eines ersten Betrags für den Abstand der Objektoberfläche (14) aus einer dem ersten Spannungssignal zugeordneten und gemessenen Lichtlaufzeit (ToF), Anpassen (130, 150, 220) des ersten Werts der Leistung der Laserquelle (10) und/oder des zweiten Werts des Verstärkungsfaktors des Detektors (16) abhängig von dem bestimmten ersten Betrag für den Abstand (d), erneutes Emittieren (110, 240) von Licht (12) durch die Laserquelle (10) und Erfassen des reflektierten oder zurückgestreuten Lichts (18) durch den Detektor (16) sowie Ausgabe eines entsprechenden zweiten Spannungssignals unter Verwendung des angepassten ersten und/oder zweiten Werts, Bestimmen (120, 260) eines zweiten Betrags für den Abstand (d) der Objektoberfläche aus einer dem zweiten Spannungssignal zugeordneten und gemessenen Lichtlaufzeit (ToF).

VERFAHREN ZUM BESTIMMEN DES ABSTANDS UND RÜCKSTRAHLVERMÖGENS EINER OBJEKTOBERFLÄCHE

BESCHREIBUNG

5

Technisches Gebiet

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen eines Abstands einer Objektoberfläche unter Verwendung einer Licht mit einer Leistung emittierenden Laserquelle und eines Detektors, der das von der Objektoberfläche reflektierte oder zurückgestreute Licht mit einer Bestrahlungsstärke erfasst und abhängig davon ein zeitabhängiges Spannungssignal ausgibt. Die vorliegende Erfindung betrifft ferner die Bestimmung des Rückstrahlvermögens der Objektoberfläche. Überdies betrifft sie eine das Verfahren durchführende Vorrichtung, insbesondere LiDAR-Systeme.

15

Stand der Technik

Solche Verfahren, die besonders auch unter der Abkürzung LiDAR (engl.: **Light Detection And Ranging**) bekannt sind, basieren auf einer optischen Abstandsmessung unter Einsatz von Laserscannern. Die Technologie ist spätestens seit den frühen 70er Jahren bekannt, als LiDAR zur Vermessung der Topografie der Mondoberfläche in den Orbitermodulen im Rahmen der Apollo 15, 16 und 17 – Missionen eingesetzt wurde. Das Grundprinzip besteht darin, dass ein Laserstrahl in Richtung auf eine Objektoberfläche ausgesendet wird, deren Abstand zu bestimmen ist, dann ein Detektor das reflektierte oder zurückgestreute Licht erfasst und die Lichtlaufzeit (*time of flight* – ToF) gemessen wird, aus der wiederum bei bekannter Lichtgeschwindigkeit der doppelte Weg der Entfernung bestimmbar ist (Hin- und Rückweg). Durch wiederholte Messungen kann dadurch auch eine Abstandsänderung ermittelt werden, welches z.B. zunehmend bei Geschwindigkeitskontrollen eingesetzt wird.

30

In den letzten Jahren ist es insbesondere auch durch Fortschritte in den Sensortechnologien, besonders aber bei den mikro-opto-elektromechanischen Bauelementen

(MEMS/MOEMS) sowie auch bei den Prozessortechnologien zu starken Schüben in neuen Industrie- und Anwendungsbereichen gekommen. Hierbei ist insbesondere der Verkehrssektor zu nennen, wo derzeit Anstrengungen unternommen werden, autonomes Fahren zu ermöglichen, und intelligente Fahrerassistenzsysteme bereits weitgehend durchgesetzt sind. LiDAR-Systeme ermöglichen hier, Umgebungen der Fahrzeuge, in denen sie implementiert sind, abzutasten und jeweils Entfernungen bis zu moderaten Reichweiten zu bestimmen. Mit den Resultaten können prozessorgestützt dreidimensionale Bilder der Umgebung aufgebaut werden, in der sich das Fahrzeug bewegt. Über die eigentliche LiDAR-Technologie hinausgehend kann es hier auch Ziel sein, das Rückstrahlvermögen (der sog. Albedo) für die jeweils vermessenen Objekt-
oberflächen zu bestimmen, um anhand bekannter Werte für spezifische Materialien Informationen über Struktur und Aufbau der betroffenen Objekte zu erhalten, beispielsweise die Frage, ob ein Baum, ein Straßenschild oder ein Auto etc. im Blickfeld ist.

Die Reichweite ist begrenzt durch die eingeschränkte Empfindlichkeit des verwendeten Sensors bzw. Detektors und die Leistung der Laserquelle. Um die Reichweite der Entfernungsbestimmung auszudehnen, könnte die Laserleistung erhöht werden, jedoch stehen dem festgelegte Sicherheitsstandards für die Gefährdung des Auges durch Laserstrahlen entgegen, die einzuhalten sind, vgl. dazu z.B. "*safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements*", in Technical Reports IEC 60825-1:2014 (2014). Im Bereich Fahrerassistenzsysteme und autonomes Fahren ist der Frequenzbereich des Laserlichts zudem auch im nahinfraroten (NIR) Wellenlängenbereich von z.B. 840 oder 900 nm bis 1550 nm gehalten, so dass hier das menschliche Auge mangels Empfindlichkeit ungeschützt ist. Für Anwendungen auf Siliziumbasis kommt der Wellenlängenbereich von 840 nm bis 950 nm in Betracht. Für III – V Compoundhalbleiter kommt der Bereich von 1.100 nm bis 1.550 nm in Betracht. Im Fall von Silizium entsteht dabei bei den niedrigen Wellenlängen der Vorteil einer erhöhten Quanteneffizienz, während die Einschränkungen durch das Erfordernis der Augensicherheitsstandards hier aber wiederum strenger ausfallen. Der NIR-Bereich erstreckt sich insgesamt von 800 nm bis 2.500 nm. Insofern liegt der Fokus der weiteren Entwicklung auf der Erhöhung der Empfindlichkeit der Sensoren, einer Erhöhung der ent-

sprechenden Verstärkung (engl.: *gain*) und einer Verbesserung des Signal-zu-Rauschverhältnisses (SNR), ebenfalls auf Seiten des Detektors.

- Bei LiDAR-Anwendungen haben sich Sensoren basierend auf Avalanche-Photodioden (APD) weitgehend durchgesetzt, da diese besonders für den Empfang und die Auswertung von Laserpulsen ausgelegt sind. Dieser Typ von Photodioden repräsentiert an und für sich hochempfindliche und schnell arbeitende Sensorelemente, die auch als Halbleiteräquivalent zu herkömmlichen Photomultipliern gelten können. Sie basieren auf PIN-Dioden, besitzen aber zusätzlich zur intrinsischen i- bzw. π -Absorptionsschicht eine dünne und hochdotierte p- oder n-Schicht, die im Fall einer angelegten Sperrspannung unterhalb der Durchbruchspannung gegenüber der benachbarten n^+ - oder p^+ -Schicht eine hohe elektrische Feldstärke erzeugt, durch welche die in der Absorptionsschicht bei Absorption eines Photons gebildeten Elektronen-Loch-Paare Ladungsträger ausbilden, die stark beschleunigt werden und durch Stoßionisation weitere Elektronen-Loch-Paare bilden, so dass ein Lawineneffekt entsteht. In diesem "strahlungsproportionaler Betrieb" genannten Modus können Multiplikationsfaktoren bzw. Verstärkungsfaktoren (engl.: *gain*) von 100 bis zu 500 erreicht werden. Allerdings reicht diese Verstärkung noch weit nicht dazu aus, jedes einzelne Photon zu erfassen.
- Die Empfindlichkeit ist durch das Verhältnis der Anzahl durch Absorption erzeugter Elektron-Lochpaare zur Anzahl der einfallenden Photonen gegeben. Bei Avalanche-Dioden wird sie auch als Quanteneffizienz (QE) bezeichnet.
- Ein ganz besonderer Vorteil besteht darin, dass eine proportionale Beziehung zwischen der Zahl einfallender Photonen und der Sensorantwort vorliegt, d.h., die Ausgangsspannung ist proportional zur entsprechenden Strahlungsleistung. Dies erlaubt es, im Fall des Einsatzes von APDs anhand des aus der Laufzeitbestimmung bekannten Abstands (d.h. bei bekannter lokaler Bestrahlungsstärke) ausgehend von dem vom Sensor ausgegebenen Spannungssignal direkt auf das Rückstrahlvermögen der jeweils betreffenden Objektoberfläche zu schließen.

Während APDs folglich eine hohe Empfindlichkeit und den Vorteil eines proportionalen Verhaltens der Ausgangsspannung gegenüber der Strahlungsleistung mit schneller Antwort bieten, steht dem eine nur unzureichende Verstärkung sowie ein nicht unerhebliches Wärme- und Schrotrauschen (engl. *shot noise*) gegenüber.

5

Speziell eingerichtete Avalanche-Photodioden können sinnvoll auch oberhalb der Durchbruchspannung betrieben werden. Dieser Betrieb wird auch als *Geiger-Modus* bezeichnet und die betreffenden Photodioden werden Einzelphoton-Avalanche-Dioden (engl.: *single-photon avalanche diode*, kurz: SPAD) genannt. Aufgrund der nun sehr hohen Feldstärken in der Multiplikationszone werden große Beschleunigungen erzielt und dadurch anhand nur eines Photons 10^6 bis 10^8 Elektron-Loch-Paare erzeugt, d.h. die Verstärkung kann über 10^6 betragen, die Erfassung einzelner Photonen wird möglich. Um zu verhindern, dass nach Erzeugung einer Lawine die Photodiode aufgrund der hohen Ströme leitfähig bleibt und damit überhaupt nicht mehr für eine weitere Erfassung von Photonen zur Verfügung steht, kann die SPAD-Diode mit einem Vorwiderstand und einer geeignet verschalteten Kapazität versehen sein. Nach Durchbruch einer Ladungsträgerlawine fällt am Vorwiderstand eine Teilspannung ab, so dass die Sperrspannung über die Diode unter die Durchbruchspannung sinkt. Dieser Vorgang wird als *Quenching* bezeichnet. Inzwischen lädt sich die über die Diode anliegende Spannung wieder auf, so dass sie in zyklischer Weise nach einer Totzeit wieder für eine weitere Lawine zur Verfügung steht. Aufgrund dieser Totzeit ist die einzelne SPAD-Diode allerdings ungeeignet für den Einsatz als LiDAR-Detektor, da wieder nicht alle Photonen erfasst werden können.

25 Dies kann allerdings durch eine Zusammenfassung von großen Zahlen von jeweils in Mikrozellen eingerichteten SPAD-Dioden zu einem sogenannten Silicon Photomultiplier (SiPM) erreicht werden, wobei die jeweils im Geiger-Modus betriebenen SPAD-Dioden einschließlich ihrer Vorwiderstände zueinander parallel verschaltet sind. Die auf die einzelnen Mikrozellen auftreffenden Photonen bewirken folglich jeweils lawinenartige Ausgangspulse, die sich insgesamt statistisch zu einem n -fach stärkeren Spannungssignal überlagern, das der SiPM-Sensor ausgibt, wobei die Zahl n der Anzahl der Mikrozellen im SiPM-Array entspricht und bei Zellgrößen von z.B. $10\ \mu\text{m}$ bis

100 μm und Gesamtausmaßen des SiPM-Sensors von $1 \times 1 \text{ mm}^2$ bis zu 10.000 Mikrozellen umfassen kann.

5 Insoweit bieten SiPM-basierte Detektoren den Vorteil einer hinreichend großen Verstärkung und überdies auch ein vergleichsweise niedriges Rauschen bzw. ein befriedigendes Signal-Rausch-Verhältnis für gemessene Spannungssignale.

10 Dem stehen allerdings wiederum leider eine geringere Empfindlichkeit sowie ein durch einen nichtlinearen Sättigungsbereich der Ausgangsspannung für hohe Strahlungsleistungen eingeschränkter dynamischer Bereich im Falle des Einsatzes von SiPM-Sensoren gegenüber. Die Empfindlichkeit ist für SiPM-Sensoren durch die Photonenerfassungseffizienz (PDE) festgelegt, die ein Produkt aus der Quanteneffizienz, einer Lawinenanstoßwahrscheinlichkeit sowie des Füllfaktors ist. Der Füllfaktor gibt den Anteil der jeweils für die Photonenerfassung zur Verfügung stehenden aktiven
15 Fläche zur Gesamtfläche der Mikrozelle an. Je mehr Zellen eingeschlossen sind, d.h. je kleiner die Zellgröße bei gegebener Gesamtfläche des SiPM-Sensors ist, desto geringer der Füllfaktor (z.B. mehr Peripheriefläche) und damit die Empfindlichkeit. Andererseits führt eine Erhöhung der Anzahl n von Zellen zu einer Ausweitung des dynamischen Bereichs, d.h., dasjenige Spannungsintervall der Ausgangsspannung, das für
20 eine Nutzung zur Verfügung steht und idealerweise die Proportionalität zwischen Strahlungsleistung und Ausgangsspannung liefert.

Bei zu starker Strahlungsleistung geht die Beziehung zwischen einer jeweiligen Spannungsamplitude als Pulsantwort auf den Laserpuls und der Pulsleistung im Fall von
25 SiPM-Sensoren in einen nichtlinearen Sättigungsbereich über, bei welchem sich zunehmend alle Mikrozellen in einem Zustand sofortiger Photonenerfassung nach dem Zurücksetzen durch *Quenching* und der sich ggf. zyklisch anschließenden Totzeit befinden. Es ist folglich immer ein schwieriger Kompromiss zwischen der Ausweitung des dynamischen Bereichs durch Verwendung von Sensoren mit mehr Zellen und der verbesserten Empfindlichkeit durch Verwendung von weniger aber dafür größeren Zellen
30 (bei fester Gesamtfläche) zu finden. Im Fall von mehr Zellen bei vorgegebener Gesamtfläche besitzen diese nämlich eine immer kleiner werdende Zellgröße, so dass

man schnell an Designgrenzen stößt und gleichzeitig die Photonenerfassungseffizienz (PDE) rapide sinkt.

Jedenfalls schränkt die Begrenzung des dynamischen Bereichs bei einem Detektor
5 unmittelbar auch den Entfernungsbereich ein, innerhalb dessen Lichtsignale noch zuverlässig für die Abstandsbestimmung erfasst und auch hinsichtlich der Ermittlung des Rückstrahlvermögens ausgewertet werden können.

Darstellung der Erfindung

10

Es ist daher eine Aufgabe der Erfindung, ein gattungsgemäßes Verfahren zum Bestimmen eines Abstands einer Objektoberfläche sowie eine entsprechende Vorrichtung bereitzustellen, bei dem ein Entfernungsbereich, innerhalb dessen Lichtsignale noch zuverlässig für die Abstandsbestimmung erfasst und auch hinsichtlich der Ermittlung des Rückstrahlvermögens ausgewertet werden können, weiter ausgedehnt wird.
15

Die Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren zum Bestimmen eines Abstands einer Objektoberfläche mit den Merkmalen von Patentanspruch 1 sowie durch eine entsprechende Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 15. Vorteilhafte Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Verfahrens sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.
20

Vorgeschlagen wird hierbei ein im Wesentlichen zweistufiges Verfahren. Ausgangspunkt ist ein Verfahren zum Bestimmen eines Abstands einer Objektoberfläche, wobei eine Licht mit einer Leistung emittierende Laserquelle und ein Detektor verwendet wird, der das von der Objektoberfläche reflektierte oder zurückgestreute Licht, das im Detektor mit einer Bestrahlungsstärke eintrifft, erfasst und abhängig davon ein zeitabhängiges Spannungssignal ausgibt. Der Detektor kann vorzugsweise ein SiPM-Sensor sein, oder ein Sensor mit ähnlichen Eigenschaften.
25

30 Zunächst werden für jede einzelne Abstandsbestimmung (im Falle der Abtastung der Umgebung durch Laserscannen also in hoher Frequenz wiederholt für die einzelnen Bildpunkte) einer der beiden folgenden Schritte oder beide durchgeführt: Es wird die

- Laserquelle eingestellt, so dass dieser in wenigstens einem Puls Licht mit einem vorbestimmten ersten Wert der Leistung emittiert, und/oder es wird der Detektor eingestellt, so dass dieser abhängig von der Bestrahlungsstärke des erfassten, reflektierten oder zurückgestreuten Lichts ein erstes Spannungssignal mit einem vorbestimmten
- 5 zweiten Wert für einen Verstärkungsfaktor bzw. den Gain ausgibt. Der Verstärkungsfaktor bzw. der Gain wird üblicherweise über die Überspannung (engl.: *overvoltage*) am Detektor eingestellt. Hier liegt ein allgemein linearer Zusammenhang zwischen den genannten Größen vor. Die Überspannung ist gleich der Differenz zwischen der (eingestellten) Sperrspannung und der jeweils anwendbaren und im Übrigen temperaturabhängigen Durchbruchspannung. Die Einstellung des Verstärkungsfaktors bzw. des
- 10 Gain ist also gleichbedeutend mit der Einstellung der Überspannung bzw. der Sperrspannung. Ebenso entspricht die Einstellung der Leistung bzw. Strahlungsleistung der Laserquelle üblicherweise der Einstellung einer Treiberspannung (engl.: *drive voltage*).
- 15 In einem weiteren Schritt wird ein erster Betrag für den Abstand der Objektoberfläche aus einer dem ersten Spannungssignal zugeordneten und gemessenen Lichtlaufzeit (ToF) bestimmt. Hierbei wird davon regelmäßig ausgegangen, dass Laserquelle und Detektor im Wesentlichen nahezu positionsidentisch sind, d.h. einen im Vergleich zum zu vermessenden Abstand vernachlässigbaren Abstand untereinander besitzen. Dies
- 20 gilt insbesondere für einen eventuellen gegenseitigen Versatz in Richtung der Objektoberfläche. Liegt ein solcher Versatz gleichwohl vor, kann dieser entsprechend bei der Erfassung und Berechnung des Abstands aus der Lichtlaufzeit (ToF) mit berücksichtigt werden.
- 25 In einem weiteren Schritt werden der erste Wert der Leistung der Laserquelle und/oder der zweite Wert des Verstärkungsfaktors bzw. des Gains des Detektors abhängig von dem aus der Laufzeitmessung bestimmten ersten Betrag für den Abstand angepasst. Die Anpassung kann dabei insbesondere so erfolgen, dass die Bestrahlungsstärke im Detektor in dessen dynamischen Bereich fällt, d.h., dass zum einen durch die Anpassung überhaupt erst einmal ein Spannungssignal mit brauchbarer Amplitude erzeugt
- 30 wird und zum anderen die Amplitude in einen Spannungsbereich fällt, in welchem – bei bekanntem Abstand – die mit der Amplitude verknüpfte Information weiter ausgewertet

werden kann, insbesondere für die Berechnung des Rückstrahlvermögens der betroffenen Objektoberfläche. Im dynamischen Bereich besteht zielweise ein im Wesentlichen linearer eineindeutiger Zusammenhang zwischen der Amplitude des Spannungssignals und der Bestrahlungsstärke (die bei gegebenem Abstand mit der Strahlungsleistung der Laserquelle korreliert).

Dem dynamischen Bereich steht ein nichtlinearer Übergangsbereich hin zu einem gesättigten Bereich gegenüber, in welchem sich bei zu starker Strahlungsleistung bzw. Bestrahlungsstärke oder zu groß eingestelltem Verstärkungsfaktor bzw. zu groß eingestellter Überspannung die Amplitudenantwort des Detektors asymptotisch einem Maximalwert der Spannung nähert, d.h., die Amplitude skaliert dann nicht mehr mit der Bestrahlungsstärke und eine Berechnung beispielsweise des Rückstrahlvermögens etc. wäre dann kaum noch möglich.

Es ist anzumerken, dass im dynamischen Bereich des Detektors im Fall von SiPM-Sensoren ein amplitudenabhängiger Zeitversatz (*time shift* oder *time walk*) auftritt: je geringer die Amplitude, desto später wird die Amplitudenantwort ausgegeben. Dieses Phänomen tritt bei APD-Sensoren nicht auf. Das Resultat würde an und für sich ein systematischen Fehler bei der Abstandsermittlung zu geringeren Amplituden bzw. Bestrahlungsstärken hin liegen. Diesem Effekt kann einem Aspekt der Erfindung zufolge durch eine Kalibrierung des Detektors Rechnung getragen werden.

In einem nachfolgenden Schritt wird basierend auf den neu angepassten ersten und/oder zweiten Werten der Strahlungsleistung bzw. des Verstärkungsfaktors erneut pulsartig Licht durch die Laserquelle emittiert und durch den Detektor das reflektierte bzw. rückgestreute Licht erfasst. Entsprechend wird vom Detektor ein zweites Spannungssignal ausgegeben.

Optional kann aus diesem zweiten Spannungssignal wiederholt die Lichtlaufzeit ermittelt und daraus wiederum ein zweiter Betrag für den Abstand der Objektoberfläche bestimmt werden. Dieser optionale zweite Betrag oder aber bereits der erste Betrag wird schlussendlich als der gemessene Abstand ausgegeben. Eine weitere Iteration ist

dann regelmäßig nicht mehr notwendig. Der erste Betrag kann möglicherweise bereits ausreichend genau bzw. nahe am tatsächlichen Wert bestimmt sein. Wichtig ist, dass das Spannungssignal für eine nachfolgende Albedobestimmung in ausreichender Qualität, d.h. mit einer Amplitude im nachfolgend zu beschreibenden dynamischen Bereich, vorliegt, die eine entsprechende Auswertung ermöglicht.

Durch die erfindungsgemäß vorgeschlagene Anpassung der Strahlungsleistung und/oder des Verstärkungsfaktors beispielsweise so, dass der Detektor die einfallende Strahlung möglichst im dynamischen Bereich erfassen kann, wird eine Ausdehnung des zu vermessenden Entfernungsbereichs, nämlich einschließlich einer Albedobestimmung, sowohl zu kürzeren Abständen hin als auch zu größeren Abständen hin möglich. Bei kürzeren Abständen kann eine Reduzierung der Strahlungsleistung die Bestrahlungsstärke des materialabhängig reflektierten bzw. rückgestreuten Lichts aus dem gesättigten Bereich des Detektors in den dynamischen Bereich ziehen.

Bei größeren Abständen kann insbesondere dann, wenn die Strahlungsleistung der Laserquelle bereits an der durch Sicherheitsstandards festgelegten oberen Grenze liegt, noch der Gain bzw. die Überspannung (*overvoltage*) des Detektors erhöht werden, wenn hierfür ein z.B. SiPM-Sensor verwendet wird. Allerdings nehmen in diesem Fall auch Effekte des sog. Afterpulsings (innerhalb von Mikrozellen) und des optischen Crosstalks (zwischen benachbarten Mikrozellen) bei diesem Typ von Sensoren zu (sinkendes Signal-Rauschverhältnis), so dass der dynamische Bereich in diesem Fall etwas schmaler wird, wenn der Gain übermäßig hoch gewählt wird, so dass der Entfernungsbereich nicht beliebig ausgedehnt werden kann. Gerade im Bereich autonomes Fahren und Fahrerassistenzsysteme ist aber durch die Erfindung eine Ausdehnung des Entfernungsbereichs unter Aufrechterhaltung von Albedomessungen von bis zu 300 m oder mehr möglich.

Einer Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens zufolge schließt der Detektor einen Silicon-Photomultiplier, d.h., einen SiPM-Sensor ein. Als Laserquelle kommt ein im nahinfraroten Spektralbereich, vorzugsweise im Bereich der Wellenlängen von 900 nm bis 1.550 nm, arbeitender Laser in Frage. Andere Wellenlängenbereiche sind aber

nicht ausgeschlossen, insbesondere im visuellen Bereich von 350 nm bis 900 nm.

Dies gilt für die Laserquelle wie auch für den SiPM-Sensor, die selbstverständlich aufeinander abgestimmt sein müssen.

- 5 Einer weiteren Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens zufolge werden die Schritte des Verfahrens im Rahmen einer LiDAR-Anwendung im Bereich Fahrerassistenzsysteme oder Systeme für autonomes Fahren zur Abtastung einer Umgebung eines Fahrzeugs für den rechnergestützten Aufbau eines dreidimensionalen Bildes der Umgebung wiederholt für einzelne Bildpunkte durchgeführt. In diesem Anwendungs-
10 feld wirken sich die durch die Erfindung erzielten Effekte besonders vorteilhaft aus.

- Einer weiteren Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens zufolge wird ein erster oberer Spannungsgrenzwert für eine Spannung vorgegeben, wobei für Spannungen unterhalb des Grenzwerts für den Detektor ein im Wesentlichen linearer Zusammenhang zwischen der Bestrahlungsstärke des einfallenden Lichts und einer infolgedessen ausgegebenen Spannung besteht, und oberhalb dessen der Zusammenhang
15 nicht-linear und/oder gesättigt ist. Dieser Spannungsgrenzwert legt also gleichermaßen die Obergrenze des dynamischen Bereichs fest. Ferner wird eine Amplitude des ersten Spannungssignals bestimmt und diese mit dem Spannungsgrenzwert verglichen, d.h. es wird bestimmt, ob das konkrete erste Spannungssignal im dynamischen Bereich liegt oder nicht. Bei dem nachfolgenden Schritt des Anpassens des ersten Werts der Leistung der Laserquelle und/oder des zweiten Werts des Verstärkungsfaktors des Detektors wird nun der Umfang dieser Anpassung abhängig von dem Ergebnis des Vergleichs durchgeführt.

- 25 Einer Verfeinerung dieses Aspekts zufolge beinhaltet die Anpassung insbesondere eine Verringerung des ersten und/oder zweiten Werts, wenn die Amplitude den Spannungsgrenzwert überschreitet, so dass im nachfolgenden Schritt die Bestrahlungsstärke des einfallenden Lichts im Detektor reduziert und infolgedessen eine Amplitude des
30 zweiten Spannungssignals unter den vorgegebenen ersten Spannungsgrenzwert fällt. Mit Vorteil wird unter diesen Umständen wieder im dynamischen Bereich des Detektors gearbeitet.

Einer weiteren Verfeinerung dieses Aspekts zufolge beinhaltet die Verringerung eine Reduzierung des ersten und/oder zweiten Werts um 40 % oder mehr, vorzugsweise 50 % oder mehr, und/oder aber um 60 % und weniger. Diese Verringerung um z.B. 40 –
5 60 % stellt sicher, dass die im zweiten Durchlauf erzielte Amplitudenantwort des zweiten Spannungssignals etwa in die Mitte des dynamischen Bereichs fällt.

Einer weiteren Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens zufolge wird ein zweiter, unterer Spannungsgrenzwert für eine Spannung vorgegeben, der für den De-
10 tektor ein vorgegebenes Signal-Rauschverhältnis, beispielsweise 2 dB oder mehr, vorzugsweise ungefähr mindestens 10 dB, gewährleistet. Dieser zweite, untere Spannungsgrenzwert legt die Untergrenze des dynamischen Bereichs fest. In weiteren Schritten wird (ähnlich wie oben) eine Amplitude des ersten Ausgangssignals bestimmt und diese mit dem zweiten Spannungsgrenzwert verglichen. Dabei beinhaltet der
15 Schritt des Anpassens des ersten Werts der Leistung der Laserquelle und/oder des zweiten Werts des Verstärkungsfaktors des Detektors eine Anhebung des ersten und/oder zweiten Werts, so dass im nachfolgenden Schritt die Bestrahlungsstärke des einfallenden Lichts im Detektor reduziert und infolgedessen eine Amplitude des zweiten Spannungssignals über dem vorgegebenen zweiten Spannungsgrenzwert liegt.
20 Analog zu dem vorhergehend beschriebenen kann die Anhebung hier z.B. so erfolgen, dass 40 bis 60 % des (vorab bekannten) Sättigungswerts der Ausgangsspannung des Detektors nach der Anpassung erhalten werden, d.h. dass die Amplitudenantwort im Fall des zweiten Spannungssignals nachfolgend im zweiten Durchlauf auch hier in der Mitte des dynamischen Bereichs liegt.

25 Die folgenden Aspekte richten sich besonders auf eine nach Erhalt eines Abstandswerts (erster oder zweiter Wert für den Abstand) durchgeführte Albedobestimmung, d.h. die Bestimmung des Rückstrahlvermögens der jeweils abgetasteten Objektoberfläche.

30 Einer weiteren Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens zufolge wird eine Funktion zwischen der Leistung des Lasers und dem Abstand der Objektoberfläche für

eine fest ausgewählte Bestrahlungsstärke des Detektors in Bezug auf das reflektierte und/oder zurückgestreute Licht bereitgestellt. Dabei wird der für die Anpassung vorbestimmte erste Wert der Leistung und/oder der vorbestimmte zweite Wert für den Verstärkungsfaktor mit dem Argument des aus dem ersten Spannungssignal bestimmten ersten Betrags für den Abstand über diese Funktion ermittelt und die Anpassung entsprechend dieser Funktion durchgeführt. Die fest ausgewählte Bestrahlungsstärke liegt z.B. vorteilhafter Weise im dynamischen, d.h. im Wesentlichen linearen Bereich des Detektors, vorzugsweise in dessen Mitte (z.B. 40 – 60 % des Werts der Ausgangsspannung, bei der diese gesättigt ist). Die Laserleistung und der Abstand sind einander dann eindeutig zugeordnet, damit die Bedingung einer konstanten Bestrahlungsstärke erfüllt ist. Die bereitgestellte Funktion bildet sozusagen einen Leitfaden für die Anpassung im zweiten Durchlauf (d.h. Anpassung der Parameter Leistung und/oder Gain sowie Erzeugung des zweiten Spannungssignals) und gewährleistet, dass der dynamische Bereich des Detektors eingehalten wird, so dass anschließend die Albedobestimmung möglich wird.

Einer weiteren Weiterbildung des vorhergehenden Aspekts zufolge wird vor dem Schritt des ersten Einstellens der Leistung des Lasers und/oder des Verstärkungsfaktors des Detektors ein Startwert für den Betrag des Abstands vorgegeben. In einem nachfolgenden Schritt wird dann die Leistung und/oder der Verstärkungsfaktor aus der vorgegebenen Funktion ermittelt, anhand welcher nachfolgend die Laserquelle und/oder der Detektor eingestellt werden können. Durch diesen Schritt kann im Verfahrensablauf von vornherein mit der vorgegeben Funktion gearbeitet werden, die den Parameterraum der einstellbaren Werte (Leistung, Gain) und das daraus erhaltene Ergebnis (Abstände) unter Einhaltung einer Bedingung (Bestrahlungsstärke im dynamischen Bereich bzw. Amplitudenantwort im Ausgangssignal des Detektors) in Beziehung setzt und somit die zyklischen Durchläufe der Verfahrensschritte erlaubt.

Einer weiteren Weiterbildung der vorhergehenden Aspekte zufolge wird für die vorgegebene Funktion zwischen der Leistung des Lasers und dem Abstand der Objektoberfläche eine untere Leistungsgrenze und eine obere Leistungsgrenze festgelegt, wobei für alle Abstände unterhalb des der unteren Leistungsgrenze zugeordneten Abstands

lediglich der Wert der unteren Leistungsgrenze zurückgegeben und verwendet wird, und für alle Abstände oberhalb des der oberen Leistungsgrenze zugeordneten Abstands lediglich der Wert der oberen Leistungsgrenze zurückgegeben und verwendet wird. Dies gewährleistet, dass nur im zulässigen Leistungsbereich der Laserquelle gearbeitet wird.

Einer weiteren Weiterbildung der vorhergehenden Aspekte zufolge wird beispielsweise die untere Leistungsgrenze einer minimalen Ausgangsleistung der Laserquelle entsprechend gesetzt. Ebenso kann die obere Leistungsgrenze einem Sicherheitsstandard der Laserquelle entsprechend gesetzt werden.

Einer weiteren Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens zufolge kann nun nach dem Schritt des Bestimmens des zweiten Betrags für den Abstand der Objekt-oberfläche aus einer dem zweiten Spannungssignal zugeordneten und gemessenen Lichtlaufzeit ein weiterer Schritt des Bestimmens des Rückstrahlvermögens der Objektoberfläche anhand des zweiten Spannungssignals und des bestimmten zweiten Werts für den Abstand durchgeführt werden. Dies entspricht z.B. der Albedobestimmung selbst. Es ist alternativ auch möglich, das zweite Spannungssignal und aber auch bereits den ersten Betrag für den Abstand bei dieser Albedobestimmung zu verwenden. Wie oben angeführt entfalten durch diesen Schritt die dies ermöglichenden, vorbereitenden Merkmale die volle vorteilhafte Wirkung. Einer vorteilhaften Abwandlung oder Ergänzung dieses Aspekts zufolge ist vorgesehen, die Albedobestimmung in jedem Durchlauf vorzusehen, d.h. auch bereits nach Bestimmung des ersten Werts für den Abstand aus dem ersten Spannungssignal heraus.

Einer weiteren Weiterbildung des vorhergehenden Aspekts zufolge wird eine zweite Funktion bereitgestellt, welche eine linearisierte Antwort y_{act} auf eine Amplitude des zweiten Spannungssignals angibt, mit der Form:

$$y_{act} = x = -\log(1 - amp / c1) \cdot c1 / c2, \quad (1)$$

wobei x der Strahlungsleistung der Laserquelle bzw. einer Treiberspannung derselben und amp der Amplitude jeweils des ersten oder zweiten Spannungssignals entspricht, und $c1$, $c2$ aus Messungen durch einen mathematischen Fit bestimmten Koeffizienten sind. Die Koeffizienten sind dabei für den verwendeten Detektor spezifisch und können sich von Detektor zu Detektor deutlich unterscheiden. Sie ist aber insbesondere anwendbar auf SiPM-Sensoren und trägt einem vorhandenen Sättigungsbereich Rechnung. Die Größe y_{act} entspricht einer Spannung (z.B. gemessen in Volt) oder einer Leistung (z.B. gemessen in Watt).

- 10 Ferner wird eine dritte Funktion bereitgestellt, welche eine linearisierte Referenzgröße y_{ref} in Abhängigkeit von einem Abstand der Objektoberfläche und einer Leistung der Laserquelle angibt, mit der Form:

$$y_{ref} = \alpha(d) \cdot x, \quad (2)$$

15 wobei x der Leistung der Laserquelle bzw. einer Treiberspannung derselben entspricht und α ein linearer Steigungsfaktor ist, mit dem eine Referenzleistung als linearisierte Referenzgröße und die Strahlungsleistung miteinander verknüpft sind und der vom jeweiligen Abstand d der Objektoberfläche abhängt. Für ein gegebenes Abstand und einen gegebenen Detektor sowie optischen Parametern (Laser und Optik) ist $\alpha(d)$ ein fest vorgegebener Wert.

25 Die linearisierte Antwort y_{act} wird dabei aus der durch Messung bestimmten Amplitude des zweiten Spannungssignals berechnet. Die linearisierte Referenzgröße y_{ref} kann aus dem ermittelten zweiten Wert für den Abstand und der Leistung der Laserquelle berechnet werden. Das Rückstrahlvermögen wird schließlich aus einem Quotienten aus der linearisierten Antwort y_{act} und der linearisierten Referenzgröße y_{ref} berechnet, insbesondere z.B. aus einer Quadratwurzel des Quotienten.

30 Einer besonderen Ausführungsform zufolge berechnet sich die linearisierte Referenzantwort y_{ref} aus:

$$y_{ref} = \exp (k1 \cdot \log(d)^2 + k2 \cdot \log(d) + k3) \cdot x \quad (3)$$

wobei x der Leistung der Laserquelle und d dem Abstand der Objektoberfläche entspricht, und $k1$, $k2$ und $k3$ aus Messungen durch einen mathematischen Fit bestimmte Koeffizienten sind.

Eine erfindungsgemäße Vorrichtung zum Bestimmen eines Abstands einer Objektoberfläche umfasst beispielsweise eine Licht mit einer Leistung emittierenden Laserquelle, einen Detektor, der das von der Objektoberfläche reflektierte oder zurückgestreute Licht mit einer Bestrahlungsstärke erfasst und abhängig davon ein zeitabhängiges Spannungssignal ausgibt, und eine Steuervorrichtung. Diese ist eingerichtet, das Verfahren mit den Schritten gemäß den obigen Ausführungen durchzuführen. Es ergeben sich dabei die gleichen Vorteile wie oben erwähnt.

Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus den Ansprüchen, der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen sowie anhand der Zeichnungen. In den Figuren bezeichnen gleiche Bezugszeichen gleiche Merkmale und Funktionen.

Kurze Beschreibung der Zeichnung(en)

Es zeigen:

Fig.1 eine schematische Blockskizze einer Vorrichtung zum Bestimmen eines Abstands einer Objektoberfläche, mit welcher ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens implementiert werden kann;

Fig. 2 eine schematische Blockskizze einer spezielleren Vorrichtung zum Bestimmen eines Abstands einer Objektoberfläche, mit welcher ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens implementiert werden kann;

Fig. 3 ein Blockschaltbild eines SiPM-Sensors;

Fig. 4 ein Ersatzschaltbild einer SPAD-Mikrozelle eines SiPM-Sensors;

5 Fig. 5 ein Diagramm mit einer Strom-Spannungskennlinie der Mikrozelle aus Fig. 4 und einer schematischen Darstellung des zyklischen Durchlaufs durch die entsprechenden Betriebsmodi bzw. -phasen;

10 Fig. 6 ein schematisches Diagramm mit Illustration der Messung der Lichtlaufzeit, wobei die Stärke eines Signals S_n (z.B. Spannung) des Pulses bzw. der Pulsantwort gegen die Zeit aufgetragen ist;

15 Fig. 7 einen schematischen Vergleich des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) aufgetragen gegen den Abstand für SiPM- und APD-Sensoren;

20 Fig. 8 einen schematischen Vergleich der über die Zeit aufgetragenen Pulsantworten zwischen SiPM- und APD-Sensoren für sechs unterschiedliche Leistungsstufen des Ausgangssignals in der Laserquelle, wobei die Pulsantworten zwischen den Sensortypen für den Vergleich absichtlich gegeneinander zeitverschoben sind;

25 Fig. 9 ein schematisches Diagramm analog zur Fig. 6 für einen SiPM-Sensor die durch Lasersicherheitsstandards einzuhaltenden Randbedingungen wobei als einstellbarer Parameter die Laserleistung dient;

Fig. 10 ein schematisches Diagramm analog zur Fig. 6 für einen SiPM-Sensor die durch Lasersicherheitsstandards einzuhaltenden Randbedingungen wobei als einstellbarer Parameter der Verstärkungsfaktor bzw. Gain dient;

30 Fig. 11 in einem Flussdiagramm den schematischen Ablauf des Verfahrens gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel;

Fig. 12 in einem Diagramm für einen SiPM-Sensor den Zusammenhang zwischen der Amplitude amp eines jeweils ausgegebenen Spannungssignals und der Überspannung (*overvoltage*) V_{OV} des Detektors bzw. einer aus der Treiberspannung der Laserquelle abgeleiteten Größe x mit linearem Zusammenhang;

5

Fig. 13 in einem Diagramm den Logarithmus der linearen Steigung, $\log(\alpha)$, der Amplitude des Spannungssignals gegenüber der Überspannung/Treiberspannung als Funktion von $\log(d)$, wobei d der Abstand von Laserquelle und Detektor ist, für die Berechnung des Rückstrahlvermögens des Oberflächenabschnitts gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel;

10

Fig. 14 in einem Diagramm eine die Berechnung des Abstands vereinfachende Funktion $V1(d)$, die die Treiberspannung der Laserquelle als Funktion des Abstands d darstellt, wobei zwischen d_{0min} und d_{0max} durch Anpassung der Treiberspannung $V1$ der Laserquelle eine Bestrahlungsstärke im Detektor unabhängig vom Abstand d immer etwa in der Mitte des dynamischen Bereichs aufrechterhalten wird;

15

Fig. 15 in einem Diagramm die Bestrahlungsstärke I_r als Funktion des Abstands d , wobei der Zielwert in der Mitte des dynamischen Bereichs zwischen SiPM-MAX und SiPM-MIN liegt und $100 \mu W/m^2$ beträgt, solange der Abstand d zwischen d_{0min} und d_{0max} fällt;

20

Fig. 16 zeigt in einem Flussdiagramm den Ablauf des Verfahrens gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel.

25

Bevorzugte Ausführungsform(en) der Erfindung

Fig. 1 zeigt anhand einer schematischen Blockskizze eine Vorrichtung 1 zum Bestimmen eines Abstands einer Objektoberfläche, mit welcher ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens implementiert werden kann. Sie zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer LiDAR-Vorrichtung für eine Abstandsbestimmung mittels Laufzeit-

30

messung (*time of flight*, ToF). Eine Laserquelle 10 emittiert in hochfrequenten Pulsen monochromatisches und kohärentes sowie scharf gebündeltes Licht 12 in Richtung auf eine Objektoberfläche 14, von welcher es reflektiert und/oder rückgestreut wird. Ein Detektor 16 empfängt bzw. erfasst das reflektierte und/oder rückgestreute Licht 18.

- 5 Eine zentrale Steuervorrichtung 20 (regelmäßig ein IC-Chip) der Vorrichtung 1 ist mit der Laserquelle 10 und dem Detektor 16 über elektronische Leitungen mit entsprechenden Schnittstellen verbunden und koordiniert den Vorgang der Pulserzeugung und -erfassung. Insbesondere kann die Steuervorrichtung 20 die betreffenden Pulssignale zuordnen und den Zeitpunkt jeweils der betreffenden Pulserzeugung in der
- 10 Laserquelle 10 und der daraus resultierenden Pulserfassung im Detektor 16 aufzeichnen und aus der Differenz die Lichtlaufzeit 22 errechnen. Bei bekannter Lichtgeschwindigkeit kann daraus (bzw. aus der den Hin- und Rückweg berücksichtigenden halben Lichtlaufzeit) sofort der Abstand d zur Objektoberfläche 14 bestimmt werden.
- 15 Bei dem in Fig. 1 gezeigten Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung 1 ist der Detektor 16 ein Silicon Photomultiplier (SiPM). Dieser zeichnet sich durch ein niedriges Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und einen hohen Verstärkungsfaktor (*gain*) aus, welcher zudem anhand der Steuervorrichtung 20 über die Steuerung der nachfolgend zu erläuternden Überspannung linear einstellbar ist. Ebenso kann die Steuervorrichtung 20
- 20 unter anderem die Leistung der Laserstrahlung über die Treiberspannung (*driver voltage*) der Laserquelle einstellen (wie aber auch Pulsdauer und Frequenz und weitere Parameter eingestellt werden können). Die Laserquelle 10 kann weitere, hier nicht gezeigte optische Elemente wie Linsen, Diffuser, Shutter, Filter und Spiegel etc. umfassen. Der Detektor kann ebenso weitere optische Elemente, insbesondere Linsen etc.
- 25 umfassen.

Fig. 2 zeigt ein weiteres, spezielleres Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung 1', wobei die Steuervorrichtung 20 eingerichtet, die Schritte des nachfolgend beschriebenen ersten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Verfahrens auszuführen. Gleiche

30 Bezugszeichen bezeichnen gleiche oder ähnliche Merkmale wie im ersten Ausführungsbeispiel, wobei auf eine Wiederholung der detaillierten Beschreibung verzichtet wird.

Die Vorrichtung 1' betrifft ein LiDAR-System für den Einsatz in Fahrzeugen, um ein ADAS-System (*advanced driver-assistance system*), d.h. ein Fahrerassistenzsystem, zu unterstützen. Es gilt hier nicht nur einfach eine Abstandsbestimmung durchzuführen, sondern ein dreidimensionales Bild der kompletten oder teilweisen Umgebung des Fahrzeugs (nicht gezeigt), in dem die Vorrichtung angebracht ist, zu erzeugen, beispielsweise um Hindernisse oder stationär angebrachte Hinweismarkierungen etc. auszuwerten. Die Laserquelle 10 umfasst hier eine im nahinfraroten (NIR) Wellenlängenbereich (900 nm bis 1.550 nm) Licht 12 in einem Strahl (wie oben beschrieben) emittierende Laserdiode. Um die Umgebung abzutasten, ist ein mikroelektromechanisches Bauelement 28 (MEMS) mit einem oder mehreren hochfrequent verstellbaren Mikrospiegeln 30 vorgesehen, die den Lichtstrahl gesteuert von der Steuervorrichtung 20 sich um eine einzelne Achse drehend bzw. hochfrequent oszillierend umlenken können. Der umgelenkte Laserstrahl (Licht 12) wird durch einen Diffuser 34 geleitet, der den Strahl in vertikaler Richtung aufweitet (in der schematische Darstellung der Fig. 2 senkrecht zu Zeichen ebene und deshalb nur schematisch angedeutet), so dass der aufgeweitete Strahl des Lichts 12 über die Umgebung in horizontaler Umlenkrichtung 32 geführt wird. Dabei überstreicht mit seinem Querschnitt die jeweiligen Oberflächen 14, die das Licht im Wesentlichen abhängig vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit reflektieren oder rückstreuen. Die Pulse der Laserdiode sind dabei mit dem oder den Mikrospiegeln 30 synchronisiert.

Ein Teil des rückgestreuten bzw. reflektierten Lichts 18 durchläuft eine Linsenoptik 26, die das Licht auf ein Photodiodenarray 24 fokussiert, das auch in diesem Ausführungsbeispiel als SiPM-Sensoren ausgebildete Detektoren 16 umfasst, welche vertikal in Reihe angeordnet sind. Die Anzahl der Detektoren 16 ist entsprechend der Aufweitung des Strahls (Licht 12) gewählt. Die Detektoren erfassen das ihnen über die Optik zugeordnete Licht 18, woraus bei Anwendung des Verfahrens von der Steuervorrichtung 20 für jeden Bildpunkt ein Abstand d und ein Wert für den Albedo (Rückstrahlvermögen) ermittelt wird. Die Bildpunkte sind in vertikaler Richtung durch die im Photodiodenarray 24 in Reihe angeordneten Detektoren 16 und in horizontaler Richtung durch diskrete Winkelpositionen des oder der Mikrospiegel(s) für die betreffenden Pul-

se festgelegt. Das schließlich zusammengesetzte Bild kann eine Auflösung von z.B. 256 x 84 Pixeln besitzen, bzw. $0,25^\circ \times 0,3^\circ$ bei einem Bildfeld von 60° horizontal und 20° vertikal. Die Reichweiten liegen bei über 200 m für die Erfassung von Fußgängern oder über 300 m für die Erfassung von anderen Fahrzeugen. Die angegebenen Werte sind rein beispielhaft und schränken den durch die Ansprüche festgelegten Schutzbereich auf keinen Fall ein.

Die Fig. 3 bis 5 illustrieren die Funktion des als SiPM-Sensor ausgebildeten Detektors 16, wie er beispielsweise in den Vorrichtungen 1, 1' der Fig. 1 oder 2 verwendet wird.

Der Gegenstand dieser drei Figuren stellt nützliches Hintergrundwissen dar. Eine genauere Erläuterung dazu ist auch in "Introduction to silicon photomultipliers (SiPMs)", White Paper by First Sensor, Version 03-12-15, heruntergeladen von <https://www.first-sensor.com/en/products/optical-sensors/detectors/silicon-photomultipliers-sipms/> am 07.11.2018 zu finden. Fig. 3 zeigt ein Blockschaltbild eines solchen SiPM-Sensors. In jeder Mikrozelle 36 ist eine hier im Geiger-Modus betriebene Avalanche Photodiode (APD) zwischen der Anodenanschluss (bei V_{BIAS}) und dem Kathodenanschluss (bei S_{OUT}) in Reihe mit einem Quench-Widerstand R_Q geschaltet. Die im Geiger-Modus betriebene Avalanche Photodiode wird auch als SPAD (*single photon avalanche diode*) bezeichnet. Diese Reihenschaltung einer jeden Zelle ist untereinander wiederum durchgehend parallel geschaltet, d.h., dass die lawinenerzeugten Strom- und Spannungspulse aller Mikrozellen 36 am Ausgang der Schaltung des Detektors 16 in gleicher Weise überlagert werden. C_D bezeichnet eine jeweils vorhandene Diodenkapazität.

Fig. 4 zeigt ein Ersatzschaltbild einer SPAD-Mikrozelle 36 eines SiPM-Sensors. Die SPAD-Diode wird dabei gebildet aus einem in Reihe angeordneten Schalter S, einer Spannungsquelle V_{BD} und einem Serienwiderstand R_S des z.B. aus Silizium gebildeten Halbleitersubstrats. Parallel dazu ist die Diodenkapazität C_D geschaltet. Wie in Fig. 3 gezeigt ist, ist dazu extern der Quench-Widerstand R_Q in Reihe gegenüber den Anschlüssen der Spannungsquelle V_{BIAS} geschaltet. Der Quench-Widerstand R_Q ist dabei weitaus größer als der Serienwiderstand R_S . Im Betrieb ist in einer ersten als Ruhemodus (*quiescent mode*) bezeichneten Phase, in der kein Photoneneinfall in den aktiven

Bereich der Mikrozeile 36 erfolgt, die Sperrspannung V_{BIAS} angelegt bzw. im Hinblick auf die Diodenkapazität C_D aufgebaut. Da die Zelle im Geiger-Modus betrieben wird, liegt V_{BIAS} oberhalb der Durchbruchspannung V_{BD} . Die Differenz zwischen der die Sperrspannung V_{BIAS} und der Durchbruchspannung V_{BD} wird als Überspannung V_{OV} (overvoltage) bezeichnet. In dem beschriebenen Zustand ist der Schalter S geöffnet und es fließt im Wesentlichen kein Strom.

Im Fall eines Photoneneinfangs schließt sich im Ersatzschaltbild der Schalter S so dass der durch die erzeugte Ladungsträgerlawine hervorgerufene Strompuls zu einer Entladung der Diodenkapazität C_D über den Serienwiderstand R_S führt, mit der Folge, dass die Spannung ausgehend von V_{BIAS} bis auf die Durchbruchspannung V_{BD} zurückfällt. Dies wird als Entladungsmodus (*discharge phase*) bezeichnet. Wie eingangs beschrieben macht sich nun der Quench-Widerstand R_Q bemerkbar, indem die an der Diode anliegende Spannung gequenchet wird, wodurch sich der Schalter S wieder öffnet.

In der folgenden als Wiederaufladungsmodus (*recovery phase*) bezeichneten Phase wird die Diodenkapazität C_D wieder über den Quench-Widerstand R_Q aufgeladen, so dass ein neuer Zyklus beginnt. Der Ablauf ist in Fig. 5 schematisch illustriert, in der eine Strom-Spannungskennlinie aufgetragen ist.

Fig. 6 zeigt in einem schematischen Diagramm das Prinzip der Laufzeitbestimmung. Aufgetragen ist ein in der Laserquelle 10 entstandenes Pulssignal S_n bzw. eine in dem Detektor 16 erfasste Pulssignalantwort "*ampl*" gegen die in der Steuereinrichtung 20 (siehe Fig. 1 oder 2) aufeinander abgestimmte Zeitachse t . Für den Ausgangspuls in der Laserquelle 10 sowie auch für die Pulsantwort im Detektor 16 können Maxima ermittelt werden, die als Zeitmarken t_{MAX1} bzw. t_{MAX2} für die Messung verwendet werden. Die zeitliche Differenz der beiden Zeitmarken t_{MAX1} und t_{MAX2} liefert die Lichtlaufzeit ToF. Es versteht sich, dass die jeweiligen Pulsbreiten (d.h. Pulsdauern) ein Limit für die Messung setzen, insbesondere für die Auflösung bzw. Genauigkeit der bestimmten Abstände d .

Fig. 7 zeigt einen schematischen Vergleich zwischen SiPM-Sensoren (durchgezogene Linie) und konventionellen APD-Sensoren (gestrichelte Linie) im Hinblick auf das jeweilige Signal-Rausch-Verhältnis SNR aufgetragen gegen den Abstand d , über den hinweg Lichtsignalpulse (über die Objektoberflächen 14) auf die Detektoren 16 übertragen wurden. Der SNR-level "min" gibt denjenigen Bereich an (unterhalb der betreffenden Linie), in welchem die Qualität des Signals ampl nicht mehr ausreicht, um einen Abstand zu bestimmen, oder um einen Abstand einschließlich zugeordnetem Rückstrahlvermögen zu bestimmen. Deutlich sichtbar besitzt die SNR-Kurve im Fall von SiPM-Sensoren von kurzen Abständen einen ausgeprägten Sättigungsbereich 38, der dazu führt, dass das SNR-Verhältnis im Fall von APD-Sensoren (mit dort weniger ausgeprägtem Sättigungsbereich 40) bei diesen Abständen deutlich besser ist. Außerhalb dieses Sättigungsbereichs 38 ist das SNR-Verhältnis von SiPM-Sensoren, wie von den Erfindern gefunden wurde, demjenigen der APD-Sensoren aber deutlich überlegen, insbesondere zu großen Abständen d hin, weshalb allein hierdurch schon die Reichweite für die Abstandsbestimmung ausgedehnt werden kann (siehe Pfeil 42 in Fig. 7).

Fig. 8 zeigt einen schematischen Vergleich der über die Zeit aufgetragenen Pulsantworten zwischen SiPM- und APD-Sensoren als Detektoren 16 für sechs unterschiedliche Leistungsstufen des Ausgangssignals in der Laserquelle 10 (9, 10, 25, 50, 88, 100 % der möglichen Leistung), wobei die Pulsantworten zwischen den Sensortypen für den Vergleich absichtlich gegeneinander zeitverschoben sind. Das Diagramm verdeutlicht die ausgeprägte Sättigung bei hohen Strahlungsleistungen in der Laserquelle 10 im Fall von SiPM-Sensoren als Detektoren 16. APD-Sensoren zeigen dagegen einen weithin linearen Zusammenhang. Ferner ist ersichtlich, dass SiPM-Sensoren für geringe Strahlungsleistungen (oder entsprechend für große Abstände) der Laserquelle 10 einen systematischen Zeitversatz aufzeigen, der in der Größenordnung der typischen Pulsbreite liegen kann.

Um nun angesichts des in den Fig. 7 und 8 gezeigten Sachverhalts im Fall von SiPM-Sensoren ein verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis bei kurzen wie auch bei großen Abständen zu erhalten, können nun gemäß dem Ausführungsbeispiel des erfindungs-

gemäßen Verfahrens abhängig vom Abstand d im Wesentlichen zwei Parameter angepasst werden: die Leistung der Laserquelle 10 und der Verstärkungsfaktor (gain) des Detektors 16 bzw. des SiPM-Sensors.

5 Die Fig. 9 und 10 zeigen analog zur Fig. 6 für einen SiPM-Sensor schematisch die dabei durch Lasersicherheitsstandards einzuhaltenden Randbedingungen. Fig. 9 illustriert für den Parameter der Laserleistung den Fall eines großen Abstands d , bei dem die Pulsantwort des Detektors 16 gerade deshalb sehr schwach ausfällt. Gezeigt sind 5 Leistungsstufen der Laserquelle und entsprechend 5 Signalantworten auf Seiten des
10 Detektors 16. Einer dem großen Abstand Rechnung tragenden Vergrößerung der Amplitude des Signals S_n der Laserleistung steht eine obere Leistungsgrenze L_{MAX} entgegen, die aus jenen Sicherheitsstandards resultiert (die z.B. das menschliche Auge schützen sollen) und in der Skizze der Fig. 9 einen gemäß dem Ausführungsbeispiel zu berücksichtigenden Ausschlussbereich 46 darstellt.

15

Bei kurzen Abständen d (nicht aus Fig. 9 erkennbar) wird dagegen eine Verminderung der Laserleistung vorteilhaft, weil der Sättigungsbereich 38 verlassen wird. Da hier trotz verringerter Leistung und damit verminderter Signalantwort das an und für sich stärkere Rauschen im Sättigungsbereich 38 (*excess shot noise*) vermieden wird, kann
20 das Signal-Rausch-Verhältnis SNR dadurch noch sehr befriedigende Werte annehmen.

Gemäß dem Ausführungsbeispiel kann folglich anhand eines bereits bestimmten Abstands abhängig von diesem eine Vergrößerung des Werts der eingestellten Laserleistung durchgeführt werden, wenn der Abstand groß ist bzw. verringert werden, wenn
25 der Abstand gering ist. Weiterbildungen dieses Ausführungsbeispiels sehen vor, eine dynamische Echtzeitanpassung abhängig vom jeweils bestimmten Abstand vorzunehmen. Ein entsprechendes Ausführungsbeispiel ist weiter unten erläutert.

30 Gleichmaßen illustriert Fig. 10 für den Parameter des Verstärkungsfaktors (gain) den Fall eines großen Abstands d . Auch hier liegt der Ausschlussbereich 46 im Hinblick auf die Laserleistung vor, jedoch erfolgt die Parameteranpassung, d.h. eine Anpassung

des Werts für den Verstärkungsfaktor auf Seiten des Detektors 16 und nicht der Laserquelle 10, so dass die Anpassung des Parameters jedenfalls nicht durch diese Bedingung beschränkt ist, wie die Fig. 10 schematisch zeigt.

- 5 Bei großen Abständen d ist gemäß diesem Ausführungsbeispiel vorgesehen, den Verstärkungsfaktor (gain) zu erhöhen, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern und insbesondere auch um den SiPM-Sensor in seinem dynamischen Bereich zu halten (siehe dazu mehr unten). Dagegen ist bei niedrigen Abständen vorgesehen, den Verstärkungsfaktor zu senken – ebenfalls um den SiPM-Sensor im dynamischen Bereich zu halten.
- 10

Fig. 11 zeigt in einem Flussdiagramm den schematischen Ablauf des Verfahrens gemäß diesem Ausführungsbeispiel. In einem Schritt 100 werden in einer LiDAR-Vorrichtung 1, 1' wie z.B. in Fig. 1 oder 2 gezeigt ein vorbestimmter erster Wert für die Leistung der Laserquelle 10 und ein vorbestimmter zweiter Wert für den Verstärkungsfaktor (gain) des Detektors 16 (SiPM-Sensor) vorgegeben (im Fall von Fig. 2: der Detektoren 16 im SiPM-Sensor-Array 24).

15

In einem folgenden Schritt 110 werden die Laserquelle 10 und der Detektor 16 entsprechend eingestellt und es wird ein Puls in der Laserquelle 10 erzeugt, bei dem Licht mit dem vorbestimmten ersten Wert der Leistung emittiert wird, wobei der Detektor 16 abhängig von der Bestrahlungsstärke des erfassten, reflektierten oder zurückgestreuten Lichts ein erstes Spannungssignal unter Anwendung des dem vorbestimmten zweiten Werts für den Verstärkungsfaktor ausgibt.

20

25 In einem folgenden Schritt 120 wird eine (nun erste) Abstandsbestimmung durchgeführt, d.h., es wird geprüft, ob eine Abstandsbestimmung überhaupt möglich ist, und wenn ja (Y/J im Schritt 120), wird ein erster Betrag für den Abstand d der Objektoberfläche 14 aus einem dem ersten Spannungssignal zugeordneten und gemessenen Lichtlaufzeit ToF ermittelt.

30

Wenn die Abstandsbestimmung nicht möglich ist (N im Schritt 120), weil das Spannungssignal ein Signal-Rauschverhältnis SNR unterhalb eines vorgegeben Mindestwerts einnimmt, werden die Parameter: Leistung der Laserquelle 10 und/oder der Verstärkungsfaktor des Detektors 16 in einem Schritt 130 angepasst, d.h., hier erhöht.

5

Wenn dagegen die Abstandsbestimmung möglich war und den ersten Betrag für den Abstand liefert (Y/J im Schritt 120), wird in einem weiteren Schritt 140 geprüft, ob das ausgegebene erste Spannungssignal im Sättigungsbereich 38, d.h. nicht im dynamischen Bereich 39 liegt (siehe Fig. 8). Dazu wird ein erster, oberen Spannungsgrenzwerts für eine Spannung vorgegeben, unterhalb dessen (dynamischer Bereich 39) für den Detektor 16 ein im Wesentlichen linearer Zusammenhang zwischen der Bestrahlungsstärke des einfallenden Lichts 18 und einer infolgedessen ausgegebenen Spannung besteht, und oberhalb dessen der Zusammenhang nicht-linear und/oder gesättigt ist (Sättigungsbereich 38). Ferner wird in diesem Schritt eine Amplitude des vom Detektor 16 ausgegebenen ersten Spannungssignals bestimmt und diese mit dem Spannungsgrenzwert verglichen.

10

15

Wird der Spannungsgrenzwert überschritten (Y/J in Schritt 140) so schreitet das Verfahren zum Schritt 150 fort. Im Schritt 150 werden die Parameter: Leistung der Laserquelle 10 und/oder der Verstärkungsfaktor des Detektors 16 angepasst, d.h., hier: verringert.

20

In beiden Fällen, dem Schritt 130, in welchem der Abstand d zu groß ist um ein brauchbares Spannungssignal mit hinreichendem Signal-Rausch-Verhältnis SNR zu liefern zu liefern, und den Schritten 140, 150, in welchen der Abstand d so gering ist bzw. die Leistung der Strahlungsquelle so groß ist, dass der SiPM-Sensor im Sättigungsbereich 38 arbeitet, werden einer oder beide Parameter dynamisch angepasst, um einen zweiten Durchlauf zu starten.

25

Dies erfolgt rekursiv zurückkehrend zu Schritt 110, in welchem die Laserquelle 10 und der Detektor 16 wieder entsprechend eingestellt bzw. nun angepasst werden. D.h., es wird wieder ein Puls in der Laserquelle 10 erzeugt, bei dem Licht mit dem jetzt ggf.

30

angepassten ersten Wert der Leistung emittiert wird, wobei der Detektor 16 abhängig von der Bestrahlungsstärke des erfassten, reflektierten oder zurückgestreuten Lichts nun ein vom ersten Spannungssignal idealerweise verschiedenes zweites Spannungssignal unter Anwendung des ggf. angepassten zweiten Werts für den Verstärkungsfaktor ausgibt, das nunmehr brauchbar ist und nicht im Sättigungsbereich 38 liegt.

Insgesamt werden folglich in den Schritten 130, 110 bzw. 150, 110 der erste Wert der Leistung der Laserquelle und/oder der zweite Wert des Verstärkungsfaktors des Detektors 16 abhängig von dem bestimmten ersten Betrag für den Abstand angepasst (verringert oder vergrößert gemäß den obigen Ausführungen mit Bezug auf die Fig. 9 und 10). Im unbrauchbaren Fall (Schritt 130) ist der bestimmte Abstand d nicht gesetzt oder beträgt mehr als ein vorab bestimmter Grenzwert, oder im Fall des Sättigungsbereichs 38 beträgt der bestimmte Abstand weniger als ein vorab bestimmter Grenzwert (wie aus Fig. 7 ersichtlich wird).

Nach dem erneute Emittieren von Licht durch die Laserquelle 10 und Erfassen des reflektierten oder zurückgestreuten Lichts durch den Detektor 16 sowie Ausgabe eines entsprechenden zweiten Spannungssignals unter Verwendung des angepassten ersten und/oder zweiten Werts kann schließlich nach Wiederholung der Schritte 110, 120, 140 ein zweiter Betrag für den Abstand der Objektoberfläche aus einer dem zweiten Spannungssignal zugeordneten und gemessenen Lichtlaufzeit ToF bestimmt werden.

Dieser sollte die entsprechenden Prüfungen in den Schritten 120, 140 jeweils mit positivem Ergebnis durchlaufen (Y/J), wonach das Verfahren gemäß diesem ersten Ausführungsbeispiel zu Schritt 160 voranschreitet. Hier wird aus dem zweiten Spannungssignal das Rückstrahlvermögen der betreffenden Objektoberfläche 14 berechnet. Da hier der Fall des dynamischen Bereichs 39 vorliegt, kann mit den Angaben des Abstands d , dem ersten Wert der Strahlungsleistung der Laserquelle 10, dem Verstärkungsfaktor (gain) des Detektors 16 und der Amplitude des zweiten Spannungssignals – ggf. mit geeigneter Kalibrierung dieser Wert für den Albedo prozessorgestützt durch die zentrale Steuereinheit 20 im Schritt 160 errechnet werden.

Zur Bestimmung des Abstands und Rückstrahlvermögens einer nächsten Objektoberfläche kehrt das Verfahren zu Schritt 100 zurück. Auf diese Weise kann die Umgebung der Vorrichtung schrittweise abgetastet und dadurch ein dreidimensionales Bild erzeugt werden. Mit Objekt erfassender Software kann dieses Bild ausgewertet werden, um beispielsweise bestimmte Gegenstände, Personen oder Verkehrszeichen etc. zu erkennen und ggf. Massnahmen zu treffen.

Ein zweites Ausführungsbeispiel ist in den Fig. 12 und 13 gezeigt. Der Fokus liegt hier auf der Bestimmung des Rückstrahlvermögens bei bereits bestimmten Abstand. Fig. 12 zeigt für einen SiPM-Sensor den Zusammenhang zwischen der Amplitude eines jeweils ausgegebenen Spannungssignals und der Überspannung (*overvoltage*) V_{OV} des Detektors 16 bzw. einer aus der Treiberspannung der Laserquelle 10 abgeleitete Größe x mit linearem Zusammenhang. Die Punkte in dem Diagramm entsprechen jeweils einer Messung in einer beispielhaften Vorrichtung 1, wie sie etwa in Fig. 1 gezeigt ist.

Der Zusammenhang entspricht einer Funktion

$$amp = c1 \cdot (1 - \exp(-(c2 \cdot x) / c1)), \quad (1)$$

die einen sehr guten Fit liefert, wobei die Amplitude amp des Spannungssignals durch den SiPM-Sensor geliefert wird und x mit der Treiberspannung $V1$ der Laserquelle 10 zusammenhängt durch:

$$x = (V1 - 2,5) / 0,5. \quad (2)$$

Die Koeffizienten $c1$ und $c2$ werden durch den Fit bestimmt. Im sehr speziellen Ausführungsbeispiel betragen sie $c1 = 0,3015$ und $c2 = 0,004296$. Der Fit ist in Fig. 12 durch eine durchgezogene Linie angedeutet. Sehr gut erkennbar ist ein relativ linearer Zusammenhang bis zu einer Amplitude von etwa 0,18 V, welches hier der dynamische Bereich 39 ist, wobei sich oberhalb von 0,18 V ein nichtlinearer Sättigungsbereich an-

schließt (bis zum asymptotischen Grenzwert bei etwa 0,55 V in diesem speziellen, nicht einschränkenden Beispiel).

- 5 In diesem zweiten Ausführungsbeispiel ist nun vorgesehen, eine Linearisierung der gezeigten Kurve vorzunehmen. Dazu wird die Gleichung (1) für die nichtlineare Amplitudenantwort amp umtransformiert nach der linearisierten Amplitudenantwort y_{act} :

$$y_{act} = x = -\log(1 - amp / c1) \cdot c1 / c2, \quad (3)$$

- 10 Die gemessenen Amplituden der Messungen für verschiedene (bekannte) Abstände bei unterschiedlicher Laserleistung (entsprechend x) können nun in Gleichung (3) eingesetzt werden und ergeben jeweils Geraden mit einer vom Abstand d abhängigen Steigung α :

$$15 \quad y_{ref} = \alpha(d) \cdot x \quad (4)$$

Um $\alpha(d)$ zu bestimmen, kann z.B. wiederum ein Fit angewandt werden, wobei auch hier eine Transformation in die logarithmische Skala durchgeführt wurde:

$$20 \quad \log(\alpha) = k1 \cdot \log(d)^2 + k2 \cdot \log(d) + k3 \quad (5)$$

Der beispielhafte Fit ist lediglich bis zur 2. Ordnung, könnte aber ohne Einschränkung auch höherer Ordnung sein. Fig. 13 zeigt aber für die Messpunkte, dass der Fit ausreichend ist. Aufgetragen ist dort $\log(\alpha)$ als Funktion von $\log(d)$, wobei d der Abstand ist.

- 25 Die für dieses spezielle Beispiel ermittelten Koeffizienten lauten: $k1 = 0,118$; $k2 = -2,438$; $k3 = 4,305$.

Für die somit empirische, linearisierte Referenzamplitude ergibt sich:

$$30 \quad y_{ref} = \exp(k1 \cdot \log(d)^2 + k2 \cdot \log(d) + k3) \cdot x. \quad (6)$$

In dem zweiten Ausführungsbeispiel kann daher die linearisierte Referenzamplitude

y_{ref} bei einem durch Lichtlaufzeitmessung bestimmten Abstand d sofort als Referenzwert aus Gleichung (6) berechnet werden. Andererseits kann die tatsächliche, linearisierte Amplitudenantwort y_{act} direkt neu gemessen bzw. bestimmt werden. Da der Abstand d in beiden Fällen der gleiche ist (der Abstand wird ja aus dem gleichen Spannungssignal gewonnen), beruht ein Unterschied zwischen den beiden Größen y_{act} und y_{ref} ausschließlich auf einem Unterschied im zugrundeliegenden Rückstrahlvermögen bzw. Albedo. Der Albedo kann aus dem Quotienten von y_{act} und y_{ref} berechnet werden:

$$albedo = albedo_{ref} \cdot (y_{act} / y_{ref})^{1/2}, \quad (7)$$

wobei $albedo_{ref}$ der Albedo eines Referenzmaterials ist, mit dem der Fit durchgeführt wurde. Idealerweise ist das Referenzmaterial ein Material mit besonders hohem Albedo, beispielsweise Aluminium mit $albedo_{ref} = 0,88$. Anders herum können aber auch andere Materialien mit niedrigerem Albedo als Referenz verwendet werden, wie z.B. Stahl mit $albedo_{ref} = 0,68$ oder Titan mit $albedo_{ref} = 0,34$, etc.. Diese Verfahrensschritte erlauben eine besonders effiziente und schnelle Berechnung des Rückstrahlvermögens, die notwendig ist, um eine zügige Aktualisierung der erfassten Umgebung zu erzielen.

Die Schritte des zweiten Ausführungsbeispiels können im Rahmen des Schritts 160 des ersten Ausführungsbeispiels durchgeführt werden, oder aber im Rahmen des Schritts 290 des nachfolgend beschriebenen dritten Ausführungsbeispiels:

Es wird diesbezüglich Bezug genommen auf die Fig. 14-16. Fig. 16 zeigt in einem Flussdiagramm den Ablauf des Verfahrens gemäß dem dritten Ausführungsbeispiel. Nach dem Start 200 des Verfahrensablaufs wird zunächst im Schritt 210 ein maximaler Abstand d_{max} (als Startwert) vorgegeben. Im Schritt 220 wird danach für diesen Startwert eine Treiberspannung $V1(d)$ gesucht, mit der die Laserquelle 10 betrieben wird, um Licht mit einer Leistung abzugeben, die ausreicht, um den Detektor 16 im dynamischen Bereich 39 zu betreiben.

Auch in diesem Beispiel wird dazu wieder eine die Berechnung vereinfachende Funktion $V1(d)$ vorgegeben, die in Fig. 14 gezeigt ist. Ziel ist es dabei, durch Anpassung der Treiberspannung $V1$ der Laserquelle 10 eine Bestrahlungsstärke im Detektor 16 unabhängig vom Abstand d immer etwa in der Mitte des dynamischen Bereichs 39 aufrecht zu erhalten. Der dynamische Bereich 39 wird durch einen oberen Grenzwert und einen unteren Grenzwert für die Bestrahlungsstärke bestimmt, die jeweils einem oberen und unteren Spannungsgrenzwert für die ausgegebene Spannung entsprechen. Der obere Grenzwert wird wie beschrieben durch die beginnende Sättigung bestimmt. Der untere Grenzwert wird durch ein minimales, für die Erfassung brauchbares und zulässiges Signal-Rausch-Verhältnis SNR bestimmt, das hier zu 10 dB festgelegt ist. In einem speziellen Beispiel liegt der untere Grenzwert SiPM-MIN bei etwa $2 \mu\text{W}/\text{m}^2$ und der obere Grenzwert SiPM-MAX bei etwa $200 \mu\text{W}/\text{m}^2$, so dass der dynamische Bereich immerhin 20 dB ausmacht.

Ein Fit wird notwendig, da die Leistung der Laserquelle 10 zwar proportional zum Quadrat des Abstands d ist, und die Treiberspannung zwar auch linear mit der Leistung zusammenhängt, jedoch erst aber einem gewissen Startwert eine Laserleistung hervorruft. Hier hat sich ein Polynomialfit 3. Ordnung bewährt:

$$V(P(d)) = e \cdot P(d)^3 + f \cdot P(d)^2 + g \cdot P(d) + h. \quad (8)$$

Im speziellen Beispiel wurden die Koeffizienten wie folgend bestimmt: $e = 0,000793$; $f = -0,005521$; $g = 2,276$; $h = 0,8674$. Die im Wesentlichen doch parabelförmige Kurve ist in Fig. 14 gezeigt. Beim Abstand $d_{0\min}$ liegt eine minimal mögliche Leistung für die Laserquelle 10 vor, im speziellen Beispiel 0,2 W. Für Abstände d unterhalb dieses Grenzwertes wird im Schritt 220 des Verfahrens in diesem speziellen dritten Ausführungsbeispiel immer der gleiche Wert in Höhe 1,5 Volt für die Treiberspannung $V1$ zurückgegeben. Desgleichen wird für alle Abstände d oberhalb eines Grenzwerts $d_{0\max}$, der einer gemäß den Sicherheitsstandards vorgegebenen Maximalleistung von in diesem Beispiel 25 W entspricht, lediglich der Wert von 66,5 Volt für die Treiberspannung $V1$ zurückgegeben. Im Beispiel wurde genau dieser obere Grenzwert $d_{0\max}$ als Startwert genommen. Im Schritt 220 wird dann der (erste) Wert der Leistung der Laserquel-

le 10 eingestellt. In diesem Ausführungsbeispiel wird der Verstärkungsfaktor bzw. Gain nicht variiert.

Im Schritt 230 wird die Laserquelle 10 getriggert und infolgedessen im Schritt 240 ein
5 Lichtpuls erzeugt. Im Schritt 250 wird das von der Objektoberfläche reflektierte bzw. zurückgestreute Licht 18 vom Detektor 16 empfangen bzw. erfasst. Im Schritt 260 kann aus dem erhaltenen (ersten) Spannungssignal der erste Wert für den Abstand bestimmt werden, hier als D bezeichnet. In Schritt 270 wird geprüft, ob $d = D$ ist, d.h. ob der erste Wert für den Abstand gleich dem als Startwert vorgegebenem Abstand ist.
10 Ist dies nicht der Fall (N in Schritt 270), zweigt der Programmablauf zurück zum Schritt 220 ab. Hier wird gemäß der Funktion in Fig. 14 bzw. Gleichung (8) eine neue Treiber-
spannung $V1$ gesucht.

Wie in Fig. 15 gezeigt ist, entspricht der in Fig. 14 gezeigte parabelförmige Abschnitt
15 einem flachen Abschnitt der Bestrahlungsstärke I_r als Funktion des Abstands. Der Zielwert in der Mitte des dynamischen Bereichs zwischen SiPM-MAX und SiPM-MIN beträgt $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Solange der Abstand d zwischen $d_{0\min}$ und $d_{0\max}$ beträgt wird dieser mittlere Wert im dynamischen Bereich 39 immer wieder aufrechterhalten. Die Abstände $d_{0\min}$ und $d_{0\max}$ betragen im Beispiel 3 und 16 m. Oberhalb von $d_{0\max}$ wird ein
20 fester Wert von $V1(d)$ zurückgegeben, so dass die Bestrahlungsstärke I_r sinkt, aber offensichtlich noch bis etwa 115 m Reichweite ausreicht, um oberhalb der unteren Grenze SiPM-MIN, also im dynamischen Bereich 39 zu liegen.

Auf der anderen Seite werden entsprechend unterhalb von $d_{0\min}$ ebenfalls nur konstan-
25 te Werte für $V1(d)$ zurückgegeben. Diese führen noch bis etwa 2 m zu Bestrahlungs-
stärken, die unterhalb der oberen Grenze SiPM-MAX des dynamischen Bereichs liegen.

Die Diskrepanz zwischen d und D in Schritt 270 kommt also zustande, wenn der tat-
30 sächliche Abstand in Fig. 15 bei weniger als $d_{0\max}$ liegt und $V1(d_{0\max})$ bei Start des Programms zurückgegeben wird. Die in Fig. 15 gestrichelte Kurve gibt diesen Wert für $V1$ wieder. Im folgenden zweiten Durchlauf wird dann der zutreffende Wert für die

Treiberspannung V_1 und daraus folgend der richtige Abstand $d = D$ im Schritt 270 gefunden.

- 5 Im Schritt 280 (Y/J in Schritt 270) wird dann wie oben im zweiten Ausführungsbeispiel beschrieben die Amplitude amp bestimmt und im Schritt 290 der Albedowert berechnet. Im Schritt 300 wird geprüft, ob weitere Bildpunkte zu erfassen sind und falls die zutrifft (Y/J in Schritt 300), zu Schritt 210 zurückverzweigt. Ansonsten endet der Programmablauf (Schritt 310).
- 10 Anzumerken ist, dass in diesem dritten Ausführungsbeispiel die Anpassung der Laserleistung nicht erst bei Überschreiten der oberen Spannungsgrenze bzw. oberen Grenze SiPM-MAX des dynamischen Bereichs 39 erfolgt sondern bereits dann, wenn überhaupt eine Änderung gegenüber dem voreingestellten Abstand festgestellt wird.

BEZUGSZEICHENLISTE:

1, 1'	Vorrichtung
10	Laserquelle
12	Laser-Lichtstrahl
14	Objektoberfläche
16	Detektor, Silicon Photomultiplier (SiPM-Sensor)
18	reflektiertes bzw. rückgestreutes Licht
20	zentrale Steuervorrichtung
22	Lichtlaufzeit (ToF)
24	Detektor-Array (SiPMs)
26	Linsenoptik
28	MEMS
30	Mikrospiegel
32	Drehrichtung des Mikrospiegels/Lichtstrahls
34	Diffuser
36	Mikrozelle (SiPM)
38	Sättigungsbereich (SiPM)
40	Sättigungsbereich (APD) (Vergleichsbeispiel)
42	Reichweitenvergrößerung durch SiPM
44	Senkung der Strahlungsleistung wg. Sicherheitsstandard
46	Ausschlussbereich
C_D	Diodenkapazität
L_{MAX}	maximal zulässige Strahlungsleistung (Laser)
R_Q	Quench-Widerstand
R_S	Serienwiderstand (Si-Substrat)
S	Schalter (Ersatzschaltbild)
100	Vorgeben eines ersten Werts für die Leistung der Laserquelle und eines zweiten Werts für den Gain des Detektors
110	Einstellen der Laserquelle und des Detektors, Erzeugen eines Pulses in der Laserquelle, und Erfassen des Pulses im Detektor gemäß den vorgegebenen Werten zur Ausgabe eines Spannungssignals

- 120 Durchführen einer Abstandsbestimmung bzw. Prüfen, ob eines Abstandsbestimmung möglich ist
- 130 Anpassen der Werte für Leistung der Laserquelle und/oder Gain des Detektors
- 140 Prüfen, ob das ausgegebene erste Spannungssignal im Sättigungsbereich, d.h. nicht im dynamischen Bereich, liegt
- 150 Anpassen der Werte für Leistung der Laserquelle und/oder Gain des Detektors
- 160 Berechnen des Rückstrahlvermögens der betreffenden Objektoberfläche aus dem zweiten Spannungssignal
- 200 Start des Verfahrensablaufs, Bereitstellen Laserquelle, Detektor und Objektoberfläche
- 210 Vorgeben eines Startwertes für den Abstand d (z.B. max. Abstand $d_{\max}$)
- 220 Suchen eines Werts für die Treiberspannung $V_1(d)$ mit der die Laserquelle betrieben wird (Anpassen und/oder Einstellen eines Werts für die Leistung der Laserquelle)
- 230 Triggern der Laserquelle
- 240 Erzeugen eines Lichtpulses
- 250 Erfassen des von der Objektoberfläche reflektierten bzw. zurückgestreuten Licht durch den Detektor und Ausgabe eines Spannungssignals
- 260 Bestimmen des Abstands D aus dem ausgegebenen Spannungssignal
- 270 Prüfen, ob $d = D$ ist (d.h., ob der bestimmte Abstand gleich dem als Startwert vorgegebenem Abstand ist)
- 280 Bestimmen der Amplitude ampl
- 290 Berechnen des Albedowerts
- 300 Prüfen, ob weitere Bildpunkte zu erfassen sind
- 310 Ende des Verfahrensablaufs

PATENTANSPRÜCHE:

1. Verfahren zum Bestimmen eines Abstands und Rückstrahlvermögens einer Objektoberfläche (14) unter Verwendung einer Licht (12) mit einer Leistung emittierenden Laserquelle (10) und eines Detektors (16), der das von der Objektoberfläche (14) reflektierte oder zurückgestreute Licht (18) mit einer Bestrahlungsstärke erfasst und abhängig davon ein zeitabhängiges Spannungssignal ausgibt, umfassend:

Einstellen (100, 110, 220, 230, 240) der Laserquelle, so dass dieser in wenigstens einem Puls Licht mit einem vorbestimmten ersten Wert der Leistung emittiert,

Einstellen (100, 110) des Detektors, so dass dieser abhängig von der Bestrahlungsstärke des erfassten, reflektierten oder zurückgestreuten Lichts ein erstes Spannungssignal mit einem vorbestimmten zweiten Wert für einen Verstärkungsfaktor ausgibt,

Bestimmen (120, 260) eines ersten Betrags für den Abstand der Objektoberfläche aus einer dem ersten Spannungssignal zugeordneten und gemessenen Lichtlaufzeit,

Anpassen (130, 150, 220) des ersten Werts der Leistung der Laserquelle und/oder des zweiten Werts des Verstärkungsfaktors des Detektors abhängig von dem bestimmten ersten Betrag für den Abstand,

erneutes Emittieren (110, 240) von Licht durch die Laserquelle (10) und Erfassen (110) des reflektierten oder zurückgestreuten Lichts (18) durch den Detektor (16) sowie Ausgabe (110) eines entsprechenden zweiten Spannungssignals unter Verwendung des angepassten ersten und/oder zweiten Werts,

Bestimmen (120, 260) eines zweiten Betrags für den Abstand (d) der Objektoberfläche (14) aus einer dem zweiten Spannungssignal zugeordneten und gemessenen Lichtlaufzeit (ToF).

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei als Detektor (16) ein Silicon-Photomultiplier (SiPM) bereitgestellt wird.

3. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei

als Laserquelle (10) ein im nahinfraroten Spektralbereich, vorzugsweise im Bereich der Wellenlängen von 840 nm bis 1.550 nm, arbeitender Laser bereitgestellt wird.

4. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei

5 die Schritte des Verfahrens im Rahmen einer LiDAR-Anwendung im Bereich Fahrerassistenzsysteme oder Systeme für autonomes Fahren zur Abtastung verschiedener Objektoberflächen (14) einer Umgebung eines Fahrzeugs für den rechnergestützten Aufbau eines dreidimensionalen Bildes der Umgebung wiederholt für einzelne Bildpunkte durchgeführt werden.

10

5. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4, ferner umfassend:

Vorgeben eines ersten, oberen Spannungsgrenzwerts (SiPM-MAX) für eine Spannung, unterhalb dessen (39) für den Detektor (16) ein im Wesentlichen linearer Zusammenhang zwischen der Bestrahlungsstärke des einfallenden Lichts (18) und einer infolgedessen ausgegebenen Spannung besteht, und oberhalb dessen (38) der Zusammenhang nicht-linear und/oder gesättigt ist,

15 Bestimmen einer Amplitude (ampl) des ersten Ausgangssignals,
Vergleichen (140) der Amplitude (ampl) mit dem Spannungsgrenzwert (SiPM-MAX),

20 wobei bei dem Schritt des Anpassens (150) des ersten Werts der Leistung der Laserquelle (10) und/oder des zweiten Werts des Verstärkungsfaktors des Detektors (16) der Umfang der Anpassung abhängig von dem Ergebnis des Vergleichs (140) durchgeführt wird.

25 6. Verfahren gemäß Anspruch 5, wobei,

wenn die Amplitude (ampl) den Spannungsgrenzwert (SiPM-MAX) überschreitet, die Anpassung eine Verringerung des ersten und/oder zweiten Werts beinhaltet, so dass im nachfolgenden Schritt (110) die Bestrahlungsstärke des einfallenden Lichts (12) im Detektor (16) reduziert und infolgedessen eine Amplitude (ampl) des zweiten Spannungssignals unter den vorgegebenen ersten Spannungsgrenzwert (SiPM-MAX) fällt.

30

7. Verfahren gemäß Anspruch 6, wobei
die Verringerung eine Reduzierung des ersten und/oder zweiten Werts um 50 %
oder mehr beinhaltet.

- 5 8. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei
Vorgeben eines zweiten, unteren Spannungsgrenzwerts (SiPM_MIN) für eine
Spannung, der für den Detektor (16) ein vorgegebenes Signal-Rauschverhältnis, vor-
zugsweise 2 dB oder mehr, weiter vorzugsweise ungefähr 10 dB oder mehr, gewähr-
leistet,
10 Bestimmen einer Amplitude des ersten Ausgangssignals,
Vergleichen der Amplitude mit dem zweiten Spannungsgrenzwert (SiPM-MIN),
wobei der Schritt des Anpassens (150) des ersten Werts der Leistung der La-
serquelle und/oder des zweiten Werts des Verstärkungsfaktors des Detektors eine An-
hebung des ersten und/oder zweiten Werts beinhaltet, so dass im nachfolgenden
15 Schritt (110) die Bestrahlungsstärke des einfallenden Lichts (12) im Detektor (16) re-
duziert und infolgedessen eine Amplitude des zweiten Spannungssignals über dem
vorgegebenen zweiten Spannungsgrenzwert (SiPM-MIN) liegt.

9. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei
20 eine Funktion ($V_1(d)$) zwischen der Leistung der Laserquelle (10) und dem Ab-
stand (d) der Objektoberfläche (14) für eine fest ausgewählte Bestrahlungsstärke des
Detektors (16) in Bezug auf das reflektierte und/oder zurückgestreute Licht (18) bereit-
gestellt wird,
wobei der für die Anpassung (220) vorbestimmte erste Wert der Leistung
25 und/oder der vorbestimmte zweite Wert für den Verstärkungsfaktor mit dem Argument
des aus dem ersten Spannungssignal bestimmten ersten Betrags für den Abstand er-
mittelt und die Anpassung entsprechend dieser Funktion durchgeführt wird.

10. Verfahren gemäß Anspruch 9, wobei
30 vor dem Schritt des ersten Einstellens (220) der Leistung des Lasers und/oder
des Verstärkungsfaktors des Detektors ein Startwert (d_{0max}) für den Betrag des Ab-
stands vorgegeben (210) wird, und in einem nachfolgenden Schritt (220) die Leistung

und/oder der Verstärkungsfaktor aus der vorgegebenen Funktion ermittelt wird, anhand derer nachfolgend die Laserquelle (10) und/oder der Detektor (16) eingestellt werden können.

5 11. Verfahren gemäß Anspruch 9 oder 10, wobei
für die vorgegebene Funktion zwischen der Leistung der Laserquelle (10) und dem Abstand (d) der Objektoberfläche (14) eine untere Leistungsgrenze und eine obere Leistungsgrenze festgelegt werden,

10 wobei für alle Abstände ($d < d_{0min}$) unterhalb des der unteren Leistungsgrenze zugeordneten Abstands (d_{0min}) lediglich der Wert der unteren Leistungsgrenze zurückgegeben und verwendet wird, und

wobei für alle Abstände ($d > d_{0max}$) oberhalb des der oberen Leistungsgrenze zugeordneten Abstands (d_{0max}) lediglich der Wert der oberen Leistungsgrenze zurückgegeben und verwendet wird.

15 12. Verfahren gemäß Anspruch 11, wobei
die untere Leistungsgrenze einer minimalen Ausgangsleistung der Laserquelle entsprechend gesetzt wird, und/oder
die obere Leistungsgrenze entweder einem Sicherheitsstandard der Laserquelle
20 entsprechend oder einer physikalischen Leistungsgrenze der Laserquelle entsprechend gesetzt wird, je nachdem welcher Wert geringer ist.

13. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei
nach dem Schritt des Bestimmens (120, 260) des zweiten Betrags für den Abstand (d) der Objektoberfläche (14) aus einer dem zweiten Spannungssignal zugeordneten und gemessenen Lichtlaufzeit (ToF) ein weiterer Schritt des Bestimmens (160, eines Rückstrahlvermögens der Objektoberfläche (14) anhand des zweiten Spannungssignals und des bestimmten ersten und/oder zweiten Werts für den Abstand (d) durchgeführt wird.

30 14. Verfahren gemäß Anspruch 13, wobei

eine zweite Funktion (y_{act}) bereitgestellt wird, welche eine linearisierte Antwort auf eine Amplitude des zweiten Spannungssignals angibt, mit der Form:

$$y_{act} = -\log(1 - amp / c1) \cdot c1 / c2,$$

wobei amp der Amplitude des zweiten Spannungssignals entspricht, und $c1$, $c2$

5 aus Messungen durch einen mathematischen Fit bestimmte Koeffizienten sind, und

eine dritte Funktion (y_{ref}) bereitgestellt wird, welche eine linearisierte Referenzantwort auf eine Amplitude des zweiten Spannungssignals in Abhängigkeit von einem Abstand der Objektoberfläche und einer Leistung der Laserquelle (10) angibt, mit der Form:

10
$$y_{ref} = \alpha(d) \cdot x,$$

wobei x der Leistung der Laserquelle entspricht und α ein linearer Steigungsfaktor ist, der vom Abstand (d) abhängt und aus Messungen durch einen mathematischen Fit bestimmt ist,

wobei die linearisierte Antwort (y_{act}) aus der durch Messung bestimmten

15 Amplitude des zweiten Spannungssignals berechnet wird,

wobei die linearisierte Referenzgröße (y_{ref}) aus dem ermittelten zweiten Wert für den Abstand (d) und der eingestellten Leistung der Laserquelle (10) berechnet wird, und

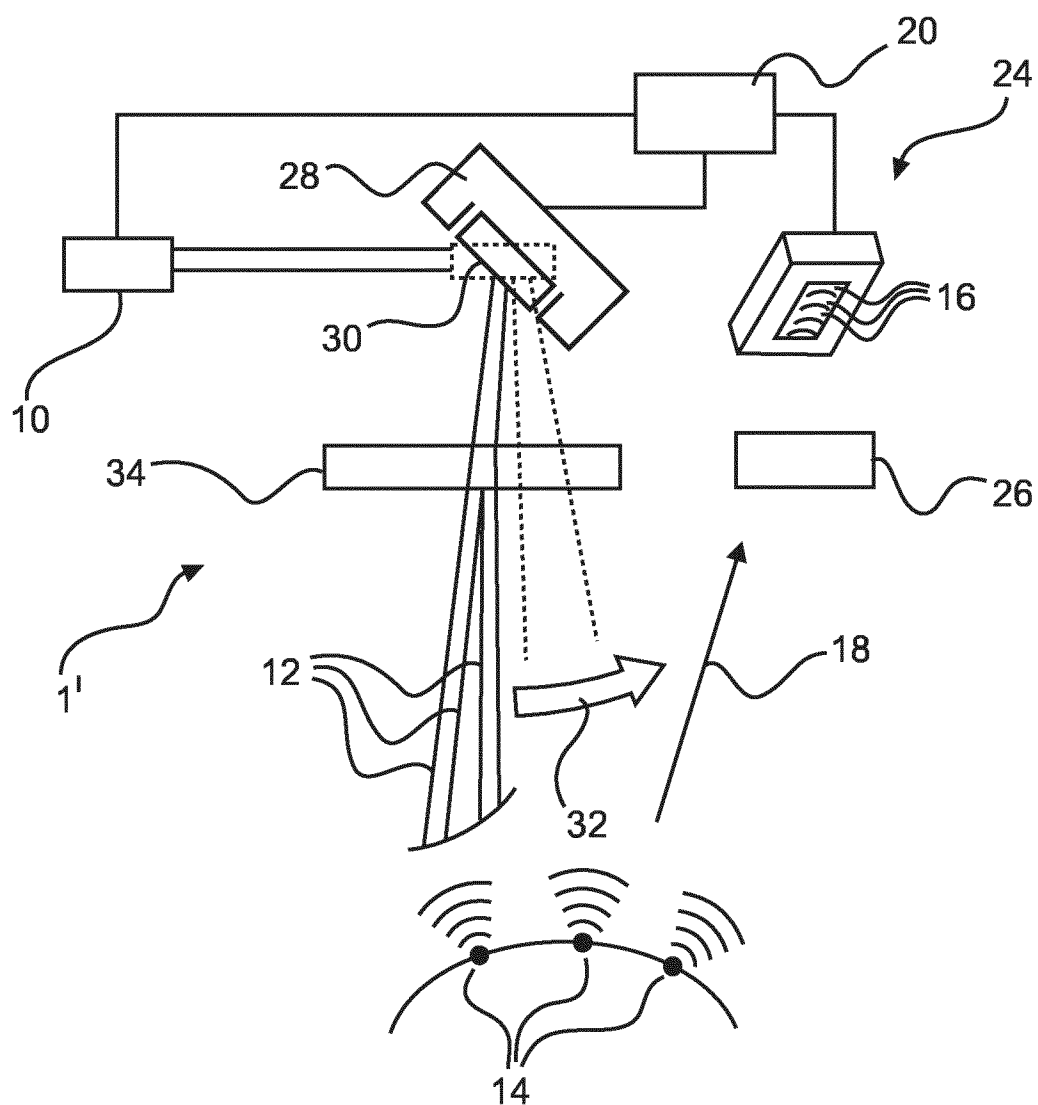
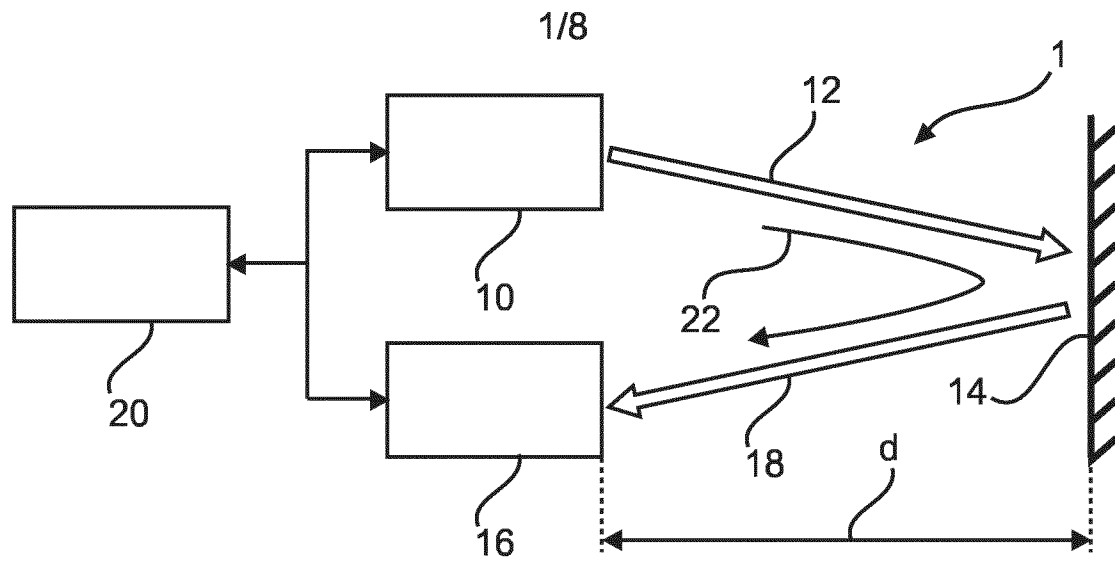
wobei das Rückstrahlvermögen berechnet wird aus einem Quotienten aus der
20 linearisierten Antwort y_{act} und der linearisierten Referenzgröße y_{ref} .

15. Vorrichtung (1) zum Bestimmen eines Abstands (d) und Rückstrahlvermögens einer Objektoberfläche (14), umfassend:

eine Licht (12) mit einer Leistung emittierenden Laserquelle (10),

25 einen Detektor (16), der das von der Objektoberfläche (14) reflektierte oder zurückgestreute Licht (18) mit einer Bestrahlungsstärke erfasst und abhängig davon ein zeitabhängiges Spannungssignal ausgibt,

eine Steuervorrichtung (20), die eingerichtet ist, das Verfahren mit den Schritten gemäß einem der Ansprüche 1 bis 14 durchzuführen.



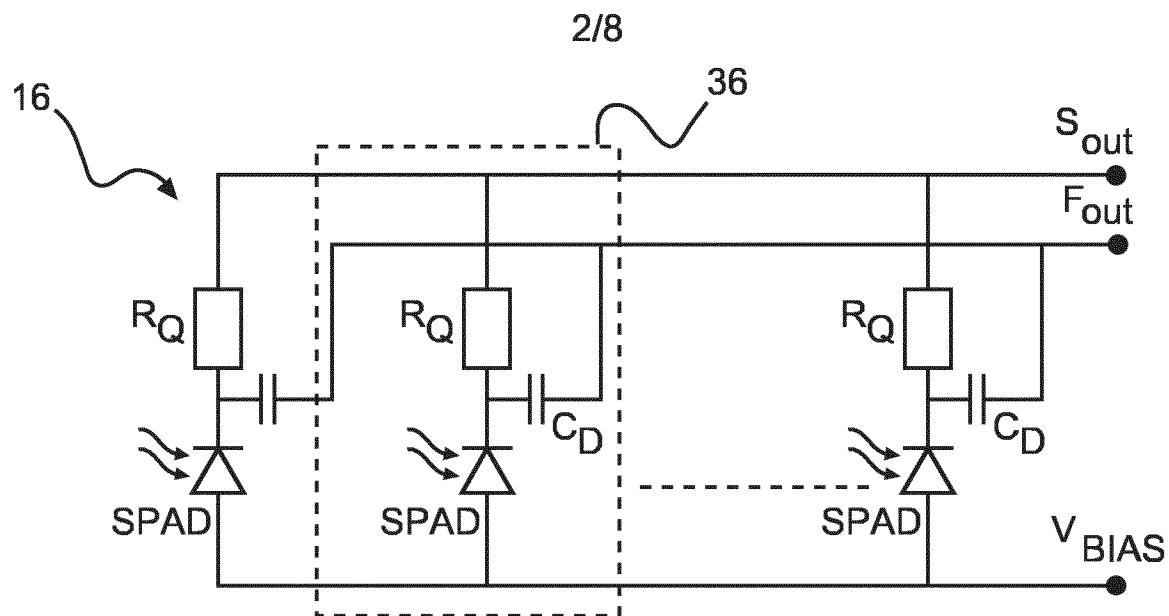


FIG. 3

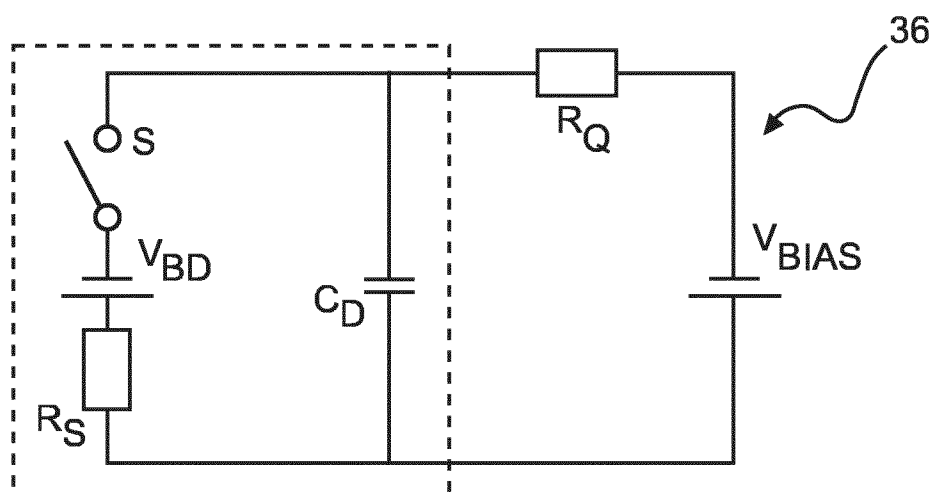


FIG. 4

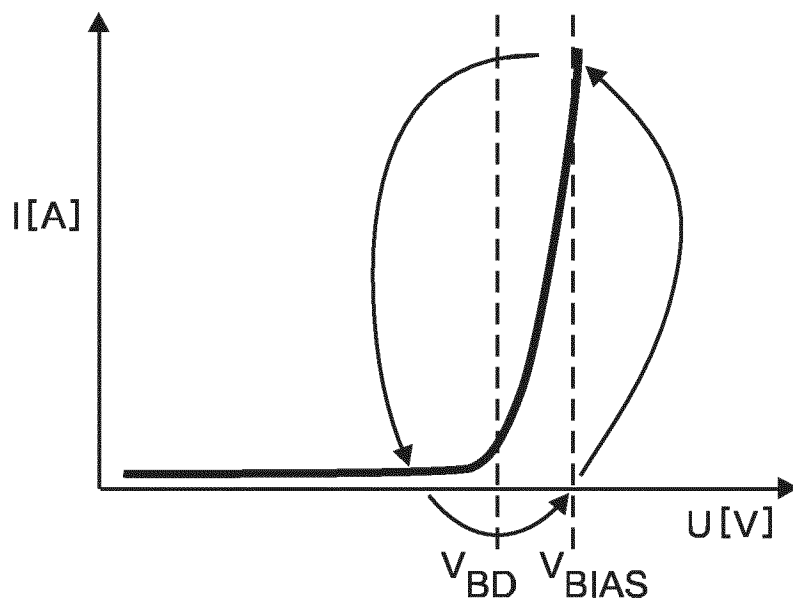


FIG. 5

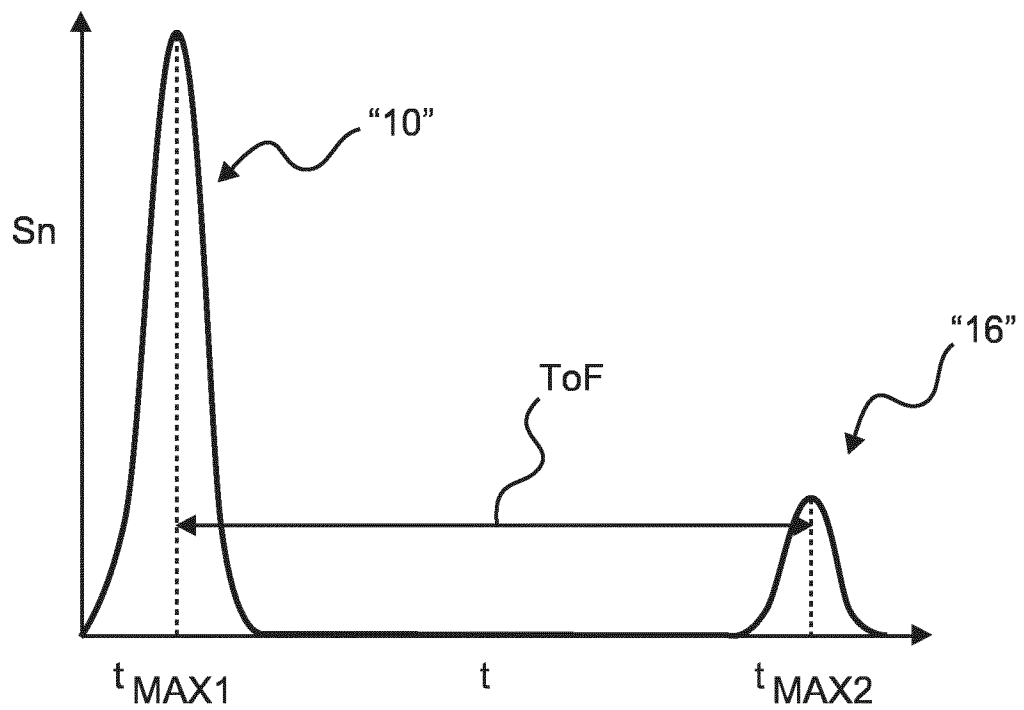


FIG. 6

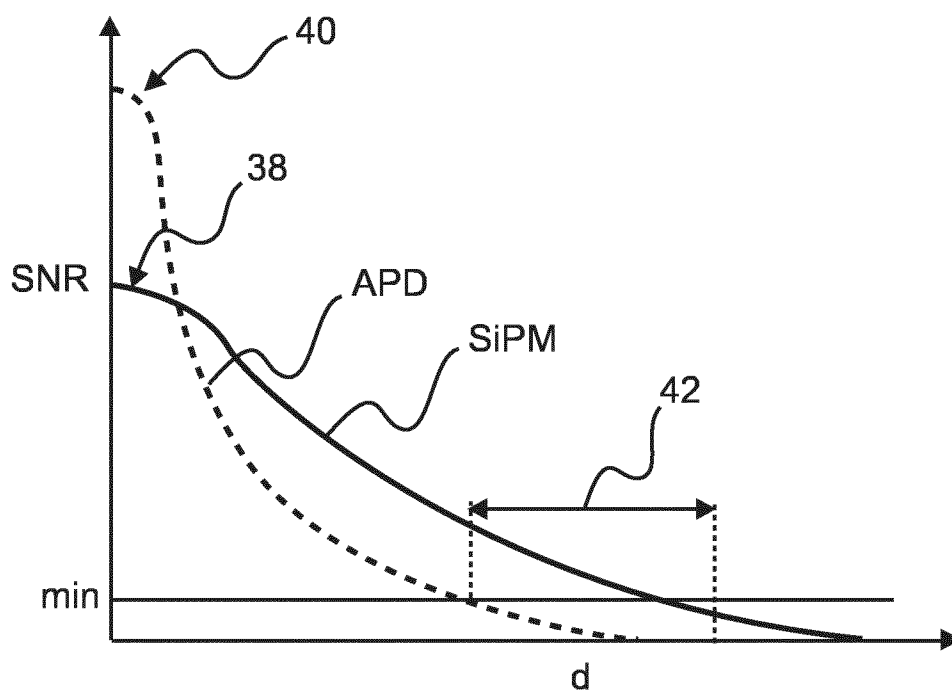


FIG. 7

4/8

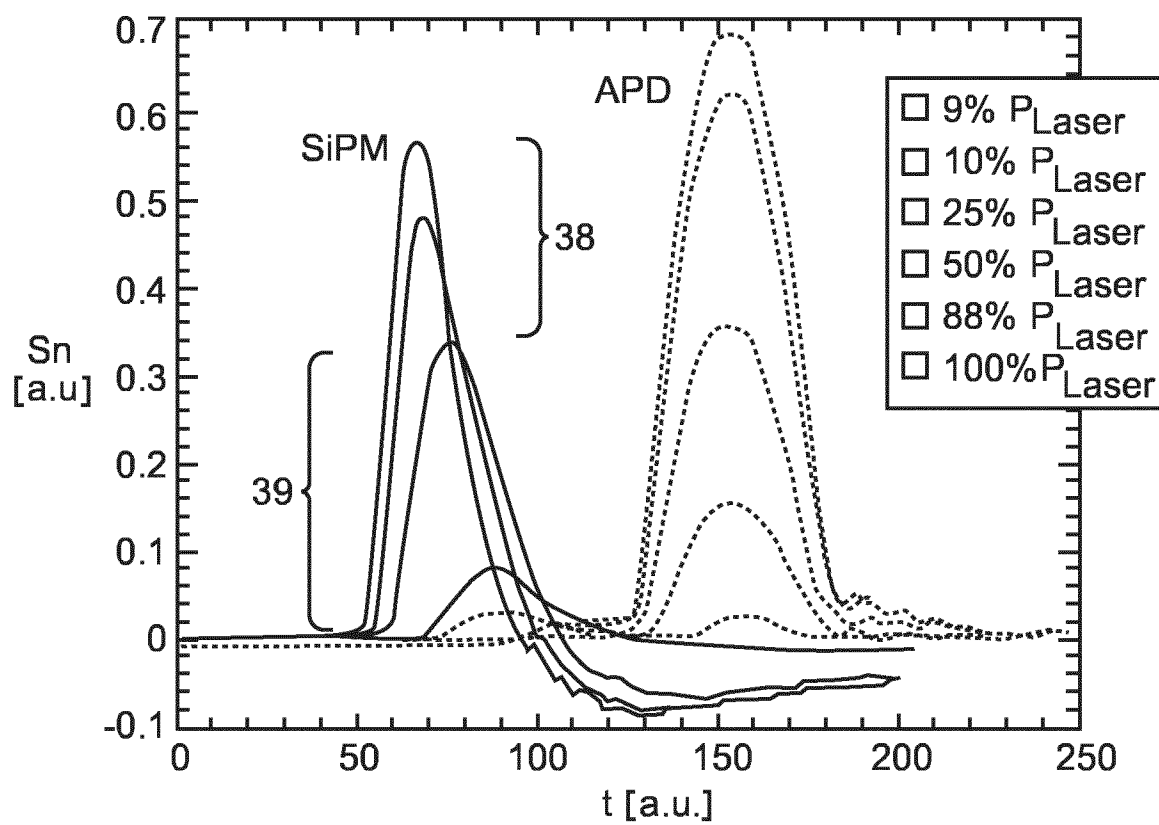


FIG. 8

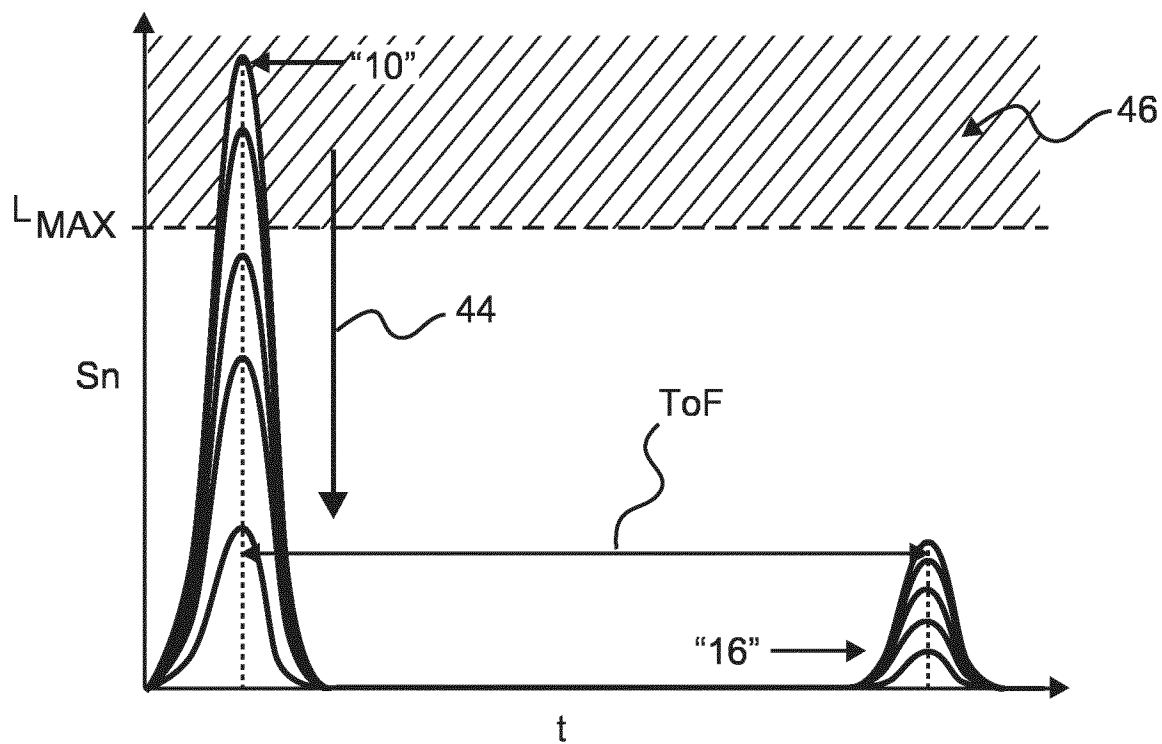
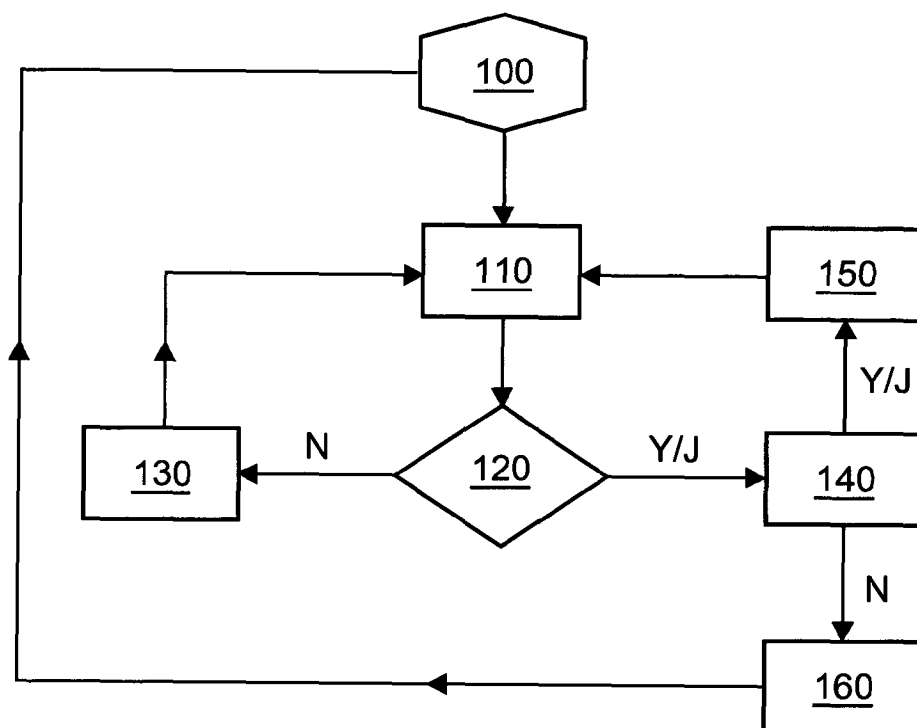
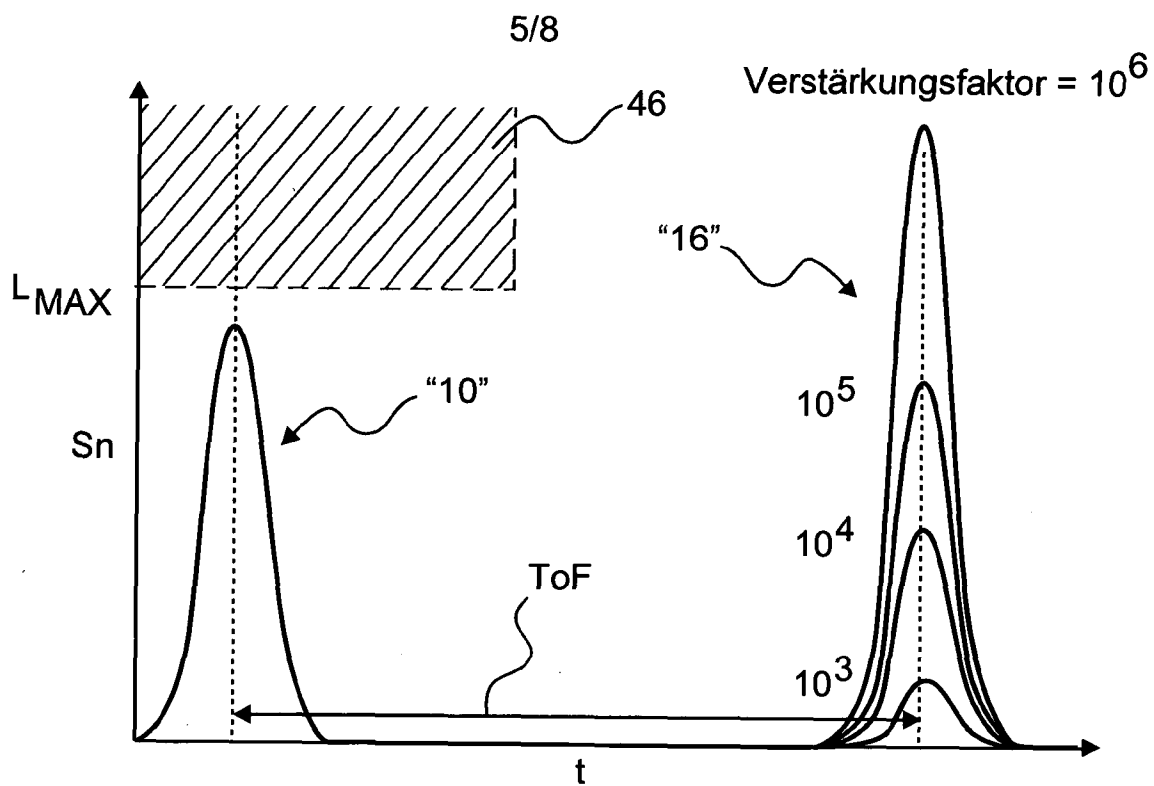


FIG. 9



6/8

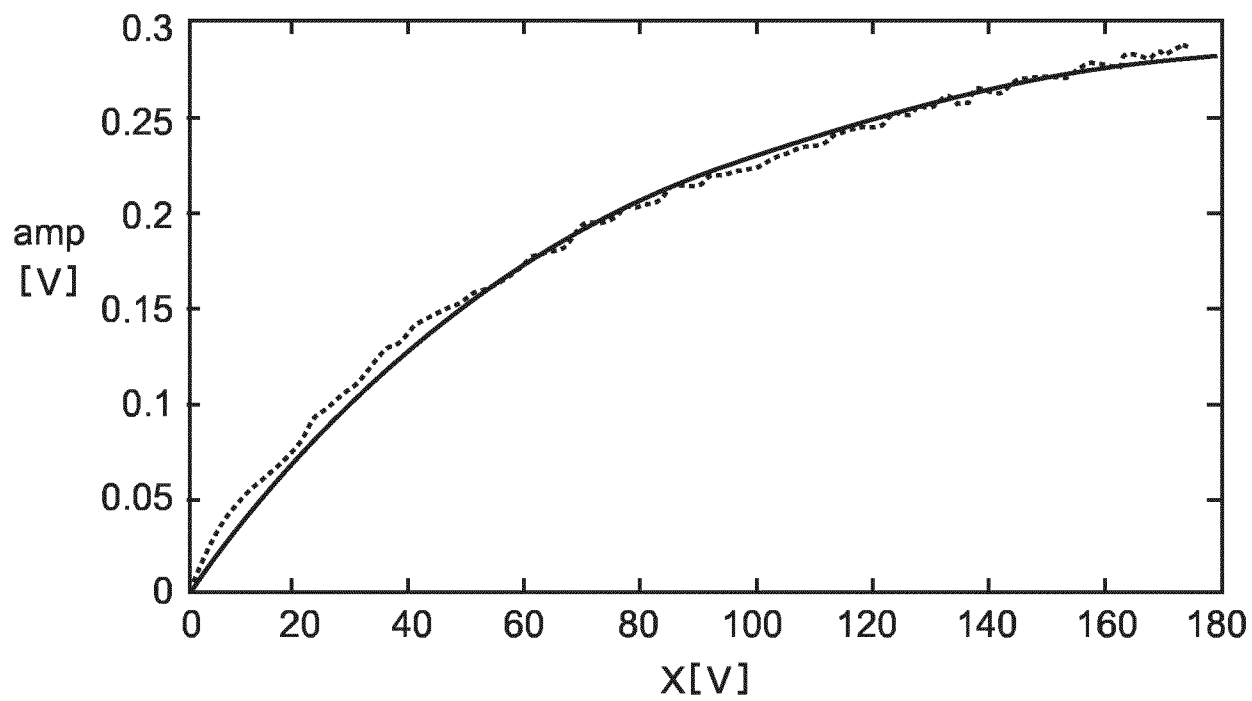


FIG. 12

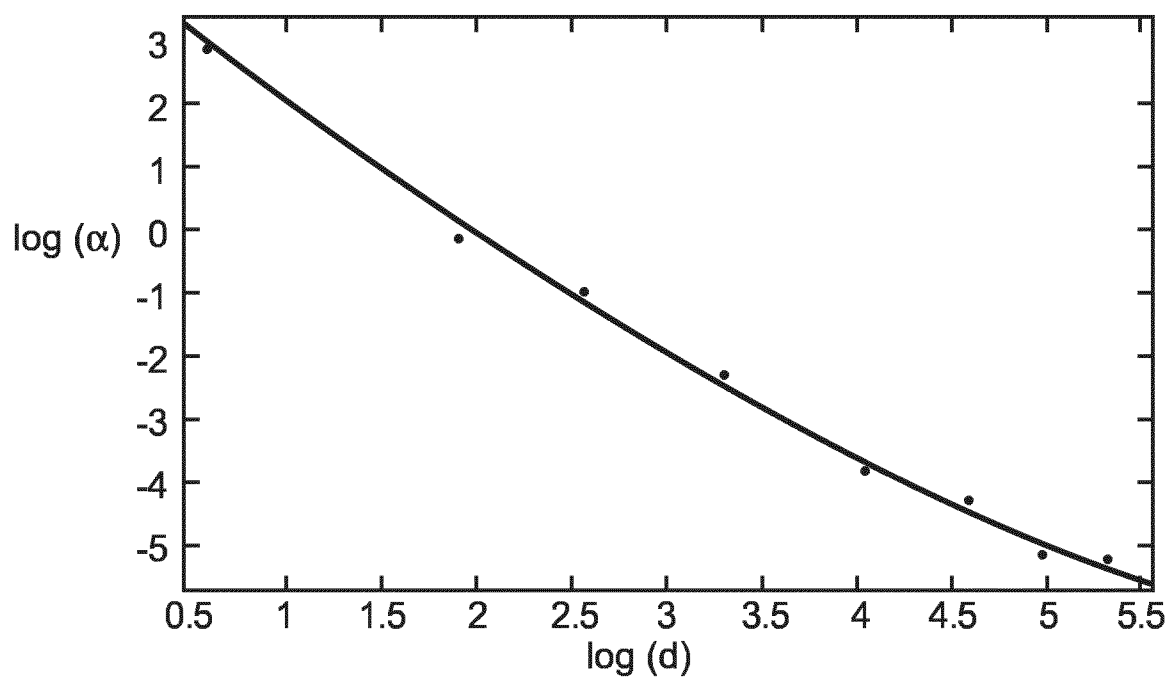


FIG. 13

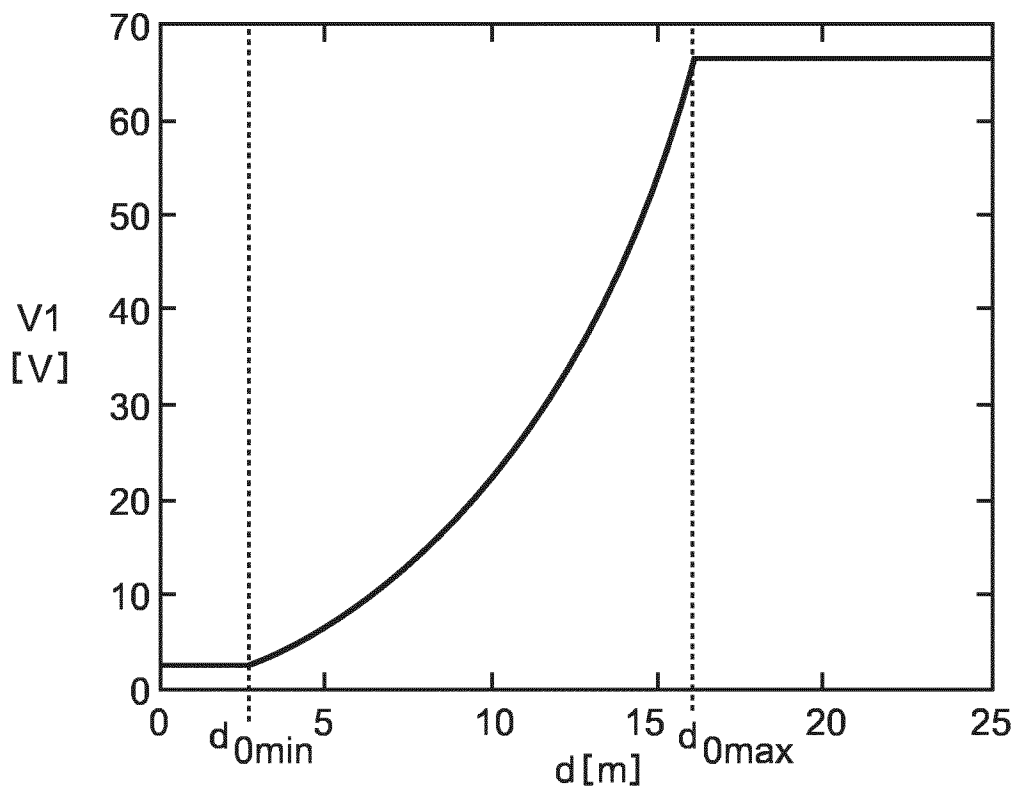


FIG. 14

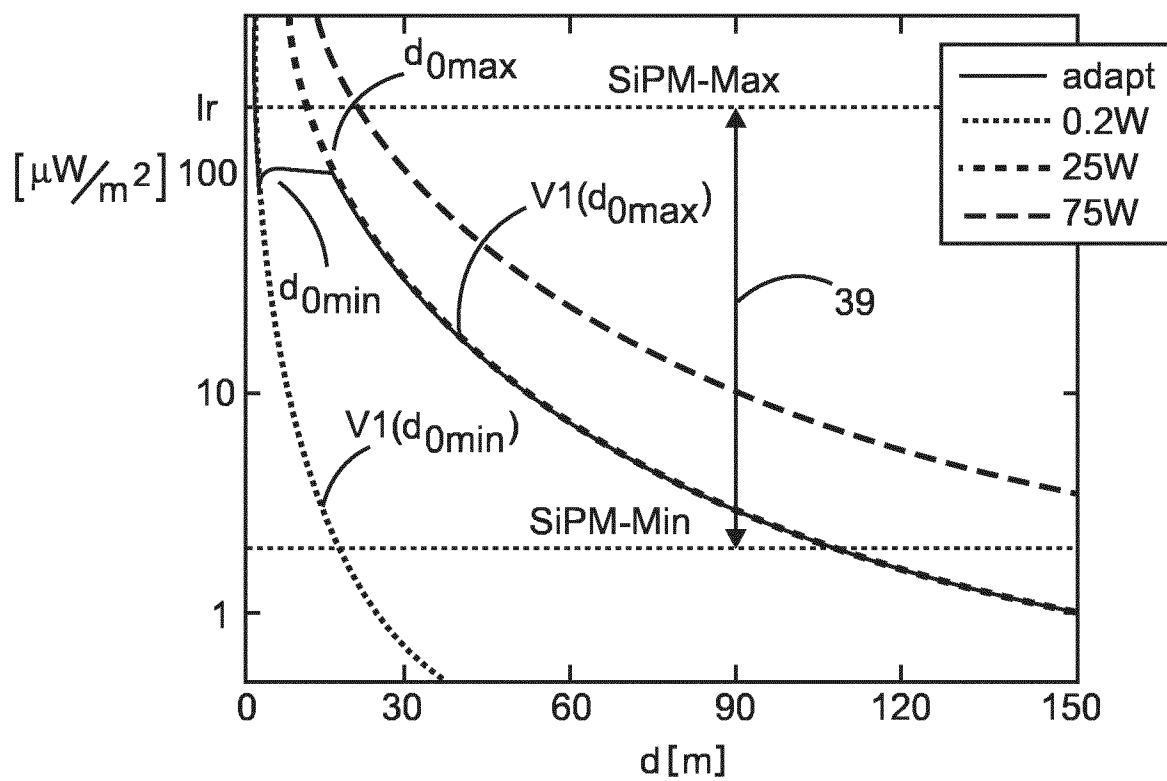


FIG. 15

8/8

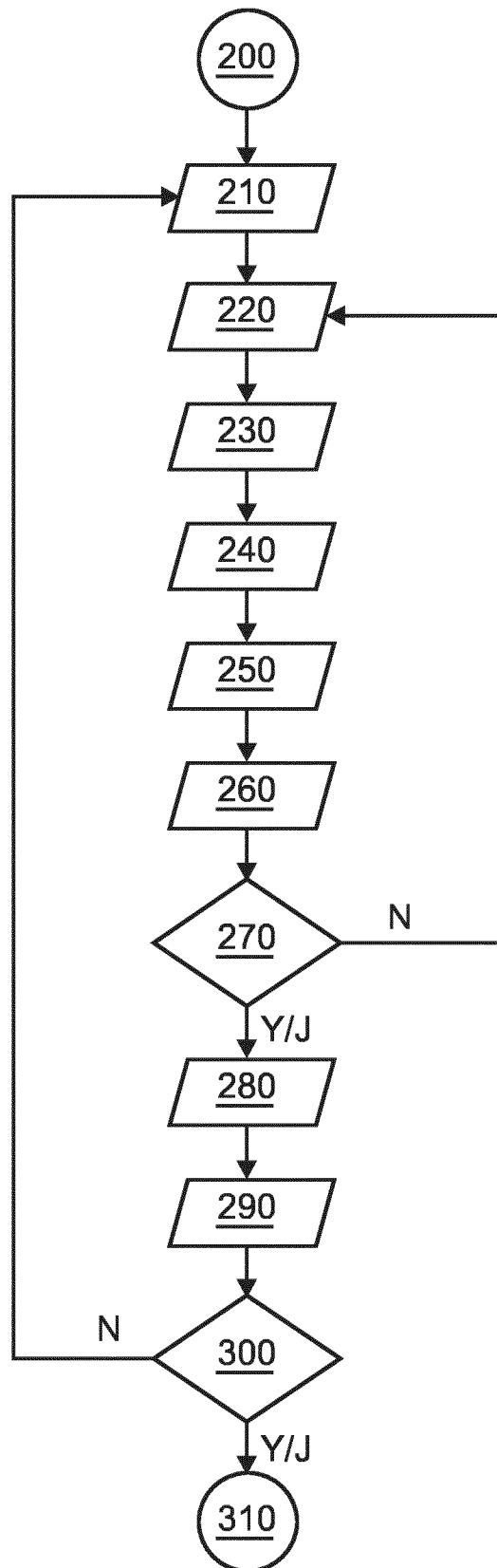


FIG. 16