



(12) **Veröffentlichung**

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2022/140485**
in der deutschen Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2
IntPatÜbkG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2021 006 609.9**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2021/064753**
(86) PCT-Anmeldetag: **21.12.2021**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **30.06.2022**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **05.10.2023**

(51) Int Cl.: **G01H 9/00 (2006.01)**
G01D 5/353 (2006.01)
G08B 21/00 (2006.01)

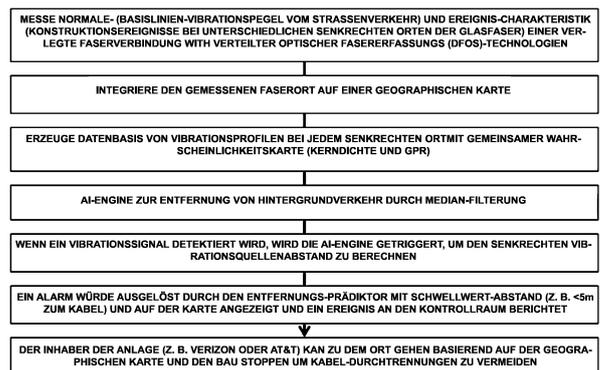
<p>(30) Unionspriorität:</p> <table border="0"> <tr> <td>63/128,970</td> <td>22.12.2020</td> <td>US</td> </tr> <tr> <td>63/192,183</td> <td>24.05.2021</td> <td>US</td> </tr> <tr> <td>17/555,990</td> <td>20.12.2021</td> <td>US</td> </tr> </table> <p>(71) Anmelder: NEC Laboratories America, Inc., Princeton, NJ, US</p>	63/128,970	22.12.2020	US	63/192,183	24.05.2021	US	17/555,990	20.12.2021	US	<p>(74) Vertreter: Betten & Resch Patent- und Rechtsanwälte PartGmbH, 80333 München, DE</p> <p>(72) Erfinder: Salemi, Milad, Cross River, NY, US; Han, Shaobo, Princeton, NJ, US; Huang, Ming-Fang, Princeton, NJ, US; Chen, Yuheng, South Brunswick, NJ, US</p>
63/128,970	22.12.2020	US								
63/192,183	24.05.2021	US								
17/555,990	20.12.2021	US								

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **VORHERSAGE DES SENKRECHTEN ABSTANDS VON SCHWINGUNGEN DURCH VERTEILTE FASEROPTISCHE ABTASTUNG**

(57) Zusammenfassung: Systeme, Verfahren und Strukturen für verteilte faseroptische Sensoren (DFOS) zur Bestimmung der Nähe von Vibrationsquellen, die sich senkrecht zu einer Sensorfaser befinden, die Teil des DFOS-Systems ist, und die möglicherweise die Sensorfaser selbst bedrohen/ beschädigen oder anderweitig gefährden könnten. Systeme, Verfahren und Strukturen gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenlegung verwenden Methoden der künstlichen Intelligenz (KI), die als Input ein grundlegendes physikalisches Verständnis der Wellenausbreitung und -dämpfung im Boden zusammen mit Bayes'scher Inferenz und Maximum Likelihood Estimation (MLE) Techniken zur Abschätzung/Bestimmung der Nähe von potenziell schädlichen Vibrationsquellen zur optischen Sensorfaser verwenden.



Beschreibung

TECHNISCHES GEBIET

[0001] Diese Offenbarung bezieht sich allgemein auf die verteilte faseroptische Abtastung (DFOS). Insbesondere geht es um ein Verfahren zur Vorhersage des senkrechten Abstands von Schwingungen durch verteilte faseroptische Abtastung.

HINTERGRUND

[0002] Wie Fachleute wissen, haben DFOS-Systeme, einschließlich verteilter akustischer Sensoren (Distributed Acoustic Sensing, DAS) und verteilter Vibrationsensoren (Distributed Vibration Sensing, DVS), bei der Überwachung einer Vielzahl von Umwelt- und Infrastrukturbedingungen breite Anwendung gefunden. Angesichts der heutigen Bedeutung solcher DFOS-Systeme wären Techniken zur Erkennung von Bedrohungen für den Betrieb eines DFOS-Systems selbst eine willkommene Ergänzung zum Stand der Technik.

ZUSAMMENFASSUNG

[0003] Ein Fortschritt in der Technik wird gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung erzielt, die auf ein Verfahren zur Bestimmung der Nähe von Vibrationsquellen gerichtet ist, die sich senkrecht zu einer Sensorfaser befinden, die Teil eines DFOS-Systems ist, und die möglicherweise die Sensorfaser selbst bedrohen / beschädigen oder anderweitig beeinträchtigen können.

[0004] Im Gegensatz zum Stand der Technik verwenden Systeme, Methoden und Strukturen gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung Methoden der künstlichen Intelligenz (KI), die als Input ein grundlegendes physikalisches Verständnis der Wellenausbreitung und -dämpfung im Boden zusammen mit Bayes'scher Inferenz und Maximum-Likelihood-Schätzung (MLE) verwenden, um die Nähe potenziell schädlicher Vibrationsquellen zur optischen Sensorfaser abzuschätzen/zu bestimmen.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNG

[0005] Ein vollständigeres Verständnis der vorliegenden Offenbarung kann durch Bezugnahme auf die beiliegende Zeichnung erreicht werden, in der:

Fig. 1 ist ein schematisches Diagramm einer illustrativen DAS-Anordnung, das die Positionierung einer Vibrationsquelle von einem faseroptischen Sensorkabel sowie senkrechte und diagonale Abstände gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung zeigt.

Fig. 2 ist ein Flussdiagramm eines illustrativen DFOS-Systembetriebs gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung;

Fig. 3(A) und **Fig. 3(B)** zeigen diskrete senkrechte Punkte eines faseroptischen Sensorkabels und einen Vergleich der Entfernungsschätzungen mit einer Wahrscheinlichkeitsdichtekarte für die gesammelten Daten gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung;

Fig. 4(A) und **Fig. 4(B)** sind Diagramme, die eine kontinuierliche Kernel-Dichtekarte und eine diskrete Binning- und Verteilungskarte gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung darstellen;

Fig. 5(A) und **Fig. 5(B)** zeigen Boxplots von Vorhersageergebnissen zu Testdaten gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung;

Fig. 6 ist ein Flussdiagramm eines Gesamtverfahrens gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung; und

Fig. 7 ist ein schematisches Diagramm, das architektonische Elemente zeigt, die in einem DFOS-System für einen Feldversuch gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung verwendet werden.

[0006] Die illustrativen Ausführungsformen werden in den Abbildungen und der ausführlichen Beschreibung ausführlicher beschrieben. Ausführungsformen gemäß dieser Offenbarung können jedoch in verschiedenen Formen verkörpert werden und sind nicht auf die in der Zeichnung und der detaillierten Beschreibung beschriebenen spezifischen oder illustrativen Ausführungsformen beschränkt.

BESCHREIBUNG

[0007] Im Folgenden werden lediglich die Grundsätze der Offenbarung erläutert. Es wird daher anerkannt, dass Fachleute in der Lage sind, verschiedene Anordnungen zu entwickeln, die, obwohl sie hier nicht ausdrücklich beschrieben oder gezeigt werden, die Grundsätze der Offenbarung verkörpern und in deren Geist und Umfang enthalten sind.

[0008] Darüber hinaus sind alle hier angeführten Beispiele und bedingten Ausdrücke nur zu pädagogischen Zwecken gedacht, um dem Leser das Verständnis der Grundsätze der Offenbarung und der von dem/den Erfinder(n) zur Förderung des Standes der Technik beigetragenen Konzepte zu erleichtern, und sind so auszulegen, dass sie keine Beschränkung auf diese speziell angeführten Beispiele und Bedingungen darstellen.

[0009] Darüber hinaus sollen alle hierin enthaltenen Aussagen, die sich auf Prinzipien, Aspekte und Aus-

führungsformen der Offenbarung sowie auf spezifische Beispiele davon beziehen, sowohl strukturelle als auch funktionale Äquivalente davon einschließen. Darüber hinaus sollen solche Äquivalente sowohl derzeit bekannte Äquivalente als auch in der Zukunft entwickelte Äquivalente umfassen, d. h. alle entwickelten Elemente, die unabhängig von ihrer Struktur die gleiche Funktion erfüllen.

[0010] So werden beispielsweise Fachleute erkennen, dass alle hierin enthaltenen Blockdiagramme konzeptionelle Ansichten von Schaltkreisen darstellen, die die Prinzipien der Offenlegung verkörpern.

[0011] Sofern hier nicht ausdrücklich anders angegeben, sind die Figuren der Zeichnung nicht maßstabsgetreu gezeichnet.

[0012] Als zusätzlichen Hintergrund möchten wir anmerken, dass in den letzten Jahren verteilte faser-optische Sensorsysteme (DFOS), einschließlich verteilter Schwingungssensoren (DVS) und verteilter akustischer Sensoren (DAS), in zahlreichen Anwendungen weit verbreitet sind, einschließlich - aber nicht beschränkt auf - Infrastrukturüberwachung, Erkennung von Eindringlingen und Erdbeben. Bei DAS und DVS werden Rückwärts-Rayleigh-Streuungseffekte genutzt, um Änderungen der Faserdehnung zu erkennen, während die Faser selbst als Übertragungsmedium dient, um das optische Messsignal zur anschließenden Analyse an einen Abfragesender zu übermitteln.

[0013] Fig. 1 zeigt ein vereinfachtes schematisches Diagramm eines DFOS/DVS/DAS-Systems mit einem Abfrage-/Empfänger-/Detektions-/Analyse-system. Im Betrieb erzeugt/legt ein solches System ein optisches Tx-Signal an eine optische Abtastfaser an, was dazu führt, dass reflektierte/gestreute optische Signale zurück zum Empfänger/Analysesystem geleitet werden, das die reflektierten/gestreuten und anschließend empfangenen Signale empfängt/erfasst/analysiert. Die Signale werden analysiert, und es wird ein Ausgangssignal erzeugt, das die Umgebungsbedingungen, einschließlich akustischer Ereignisse, Schwingungseignisse und/oder Temperaturbedingungen, die entlang der Länge der Faser auftreten, anzeigt.

[0014] Wie wir zeigen und beschreiben werden, offenbaren Aspekte der vorliegenden Offenlegung Systeme, Methoden und Strukturen, die eingesetzt werden können, um Bedrohungen durch physische Schäden an erdverlegten Glasfaserkabeln unter Verwendung von DFOS-Technologien (Distributed Fiber Optic Sensing) und KI-basierten Abstandsvorhersagemodellen zu erkennen.

[0015] Fachleute verstehen und schätzen, dass der Schutz von erdverlegten Glasfaserkabeln - ein-

schließlich DFOS-Sensorkabeln - vor möglichen Schäden durch autorisierte oder unbefugte Bauarbeiten durch verschiedene Maschinen wie Bagger, Bohrer usw. ein Hauptanliegen der Beteiligten an einer solchen Infrastruktur ist, um diese Vermögenswerte zu schützen und die Kontinuität der Dienstleistungen für alle Kunden aufrecht zu erhalten. Die hier vorgestellte Technologie bietet den Vorteil eines intelligenten Frühwarnsystems, das bei möglichen und/oder drohenden Schäden oder Bedrohungen von Glasfaserkabeln Alarm schlägt, indem es den Standort und die Entfernung einer potenziellen Bedrohungsquelle von der Glasfaser erkennt und einschätzt.

[0016] Wir weisen daraufhin, dass es bereits zahlreiche Versuche mit Geophonen und Beschleunigungsmessern zur Lokalisierung von Vibrationsquellen in der Umgebung gegeben hat. In jüngerer Zeit wurden diese Bemühungen erweitert, um senkrechte Entfernungen auf der Grundlage der Ankunftszeit von Ausbreitungswellen zu schätzen, und es wurde eine Random-Forrest-Klassifizierungsmethodik eingeführt. Wie Fachleute wissen und verstehen, sind Entfernungsmessverfahren, die von der Ankunftszeit der sich ausbreitenden Wellen abhängen, in hohem Maße von einer Frequenzkomponentenanalyse der Schwingungsquelle abhängig und besonders schwierig zu erkennen und zu verfolgen, da die Entfernungsskala oft zu kurz für die Geschwindigkeit ist, mit der sich die Wellen im Boden bewegen. Dies macht solche Methoden fehleranfällig, da die Zeitdifferenz zwischen den Ankunftszeiten der Bodenwellen sehr klein ist.

[0017] Mit Bezug auf Fig. 1 stellen wir fest, dass Maschinen oder Geräte, die den Zustand des Bodens verändern, wie z. B. Bagger, Pressluftschlämmer, Bohrer, Verdichter usw., Bodenwellen erzeugen, die im Allgemeinen Körper- (P), Scher- (S) und Raleigh- (R) Wellen umfassen können. Diese Wellen breiten sich von ihrer Quelle aus als Front aus, die im Wesentlichen die Form einer Halbkugel hat. Die Amplitude(n) dieser Wellen werden aufgrund von Strahlung und Materialdämpfung gedämpft, wenn sie eine Sensorfaser erreichen - je nach der Entfernung, die sie von der Quelle zur Sensorfaser zurücklegen.

[0018] Ein in jüngster Zeit in der Literatur diskutierter Ansatz besteht in der Suche nach Parametern für die für die Dämpfung maßgeblichen Gleichungen, um die Wellenausbreitung unter verschiedenen Bodenbedingungen zu modellieren, d. h. in analytischen Lösungen. Leider ist die Kalibrierung solcher Modelle aufgrund der Komplexität und Heterogenität des Bodens sehr rechenintensiv und daher in der Praxis kaum durchführbar. Ungeachtet dieser Schwierigkeiten bleibt eine grundlegende These in der Praxis bestehen, nämlich dass eine Kombination aus Mate-

rialeffekten und Entfernungseffekten die Dämpfung der Wellenausbreitung im Boden in der Nähe einer vergrabenen optischen Faser bestimmt.

[0019] In diesem Sinne stellen wir fest, dass diese und andere beobachtbare/bestimmbare Fakten verwendet werden, um Modelle gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung zu entwickeln, die vorteilhafterweise die Parameter, die die Analysemethoden des Standes der Technik lähmen, nicht kennen oder lernen müssen. Infolgedessen liefern Systeme, Verfahren und Strukturen gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung einen geschätzten senkrechten Abstand einer Schwingungsquelle zu einer vergrabenen optischen Faser.

[0020] Unter fortgesetzter Bezugnahme auf **Fig. 1** sind ein illustrativer Systemaufbau und Testschemata für ein illustratives DFOS-System dargestellt. Das optische Erfassungssystem (DFOS) und der KI-basierte Entfernungsprädiktor sind in einem Kontrollraum/einer Zentrale untergebracht, das/die vorteilhafterweise die Fernüberwachung einer gesamten faseroptischen Sensorkabeltrasse ermöglicht.

[0021] Je nach ihrem Abstand von der Vibrationsquelle werden die Messpunkte entlang der optischen Faser unterschiedliche Amplituden der Vibrationswellen erfahren. Im Allgemeinen werden Punkte entlang der optischen Faser, die sich im kürzesten Abstand zwischen der Vibrationsquelle und der optischen Sensorfaser befinden (senkrechter Abstand - Punkt 3 in **Fig. 1**), eine Vibrationswelle mit der höchsten Amplitude erfahren, verglichen mit Punkten, die sich weiter von der Quelle entfernt entlang des optischen Faserkabels befinden (diagonaler Abstand - Punkte 1, 2, 4 und 5 in **Fig. 1**). An einem Punkt, der sich in größerer Entfernung befindet, werden die Schwingungen vollständig abgebaut und bleiben an diesen weiter entfernten Punkten unentdeckt.

[0022] Für unsere Zwecke jedoch ermöglicht die Tatsache, dass jede Schwingung einer potenziellen Schwingungsquelle mehrere gleichzeitige Sensorrückmeldungen (erfasste Schwingungen) erzeugt, die Erstellung eines Schwingungsintensitätsprofils für diese Strecke.

[0023] Wenn genügend solcher sensorischer Erfassungen gemacht werden, kann ein Bayes'sches Schlussfolgerungsmodell durch eine gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion oder eine gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion erstellt werden, die die Vibrationsquelle der Vibrationsintensität zuordnet. Die Daten können in verschiedenen senkrechten Abständen vom faseroptischen Sensorkabel in konstanten Intervallen gesammelt werden.

[0024] Wie in **Fig. 1** illustrativ dargestellt, befindet sich eine Vibrationsquelle in einem Abstand von 1 m zu einem vergrabenen Glasfasersensorkabel bis zu 12 m von diesem Glasfaserkabel. Der Abstand zwischen den Messpunkten des Glasfasersensors ist bekannt, da er durch die gewünschte räumliche Auflösung des verwendeten DFOS-Systems bestimmt wird, bei dem es sich gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung vorteilhafterweise um ein verteiltes akustisches Sensor- (DAS) oder ein verteiltes Schwingungssensor-System (DVS) handeln kann.

[0025] Um eine solche Karte zu entwickeln, sammeln wir eine Reihe von Trainingsdaten, um die kanonische gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung der Entfernungen vom Glasfaserkabel und der beobachteten Intensität zu ermitteln. Da die Testdaten in diskreten Abständen erhoben werden, ist das Produkt eine gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung. Wir weisen darauf hin, dass die Methoden der Kernel-Dichte oder der Gauß'schen Prozessregression (GPR), die als strittige Überlagerung verwendet werden, ebenfalls erfolgreich zur Ermittlung gemeinsamer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen eingesetzt wurden.

[0026] Unter Verwendung einer solchen Karte und der Tatsache, dass es bei jedem senkrechten Abstand mehrere diagonale Abstände gibt, die mit größerer Wahrscheinlichkeit bei diesem bestimmten senkrechten Abstand gebildet werden, kann eine maximale Wahrscheinlichkeit für den senkrechten Abstand von der optischen Faser berechnet werden. Ein Flussdiagramm des Verfahrens ist in **Fig. 2** illustrativ dargestellt.

[0027] Unter Bezugnahme auf diese Abbildung stellen wir fest, dass „I“ für Inputs, „P“ für Verfahren und „O“ für Outputs steht. Sie werden im Folgenden näher erläutert.

[0028] Das System nimmt die folgenden Eingaben entgegen.

I-1: Statistik des normalen Szenarios: Nach einer gewissen Zeit der Überwachung der Feldbedingungen durch das DFOS-System wird eine Statistik der Messsignalintensität als Systembasislinie erstellt, die Signale von z. B. Straßenverkehr zusätzlich zum Hintergrundrauschen für die gesamte Länge der LWL-Sensorkabeltrasse (ohne Bauwerke) enthält.

I-2: DFOS-Wasserfallstrom: Besteht aus Schnappschüssen von Wasserfalldaten des DFOS-Sensors auf der Grundlage eines gleitenden Zeitfensters.

I-3: Alarmschwelle: Die Entfernung der Vibrationsquelle wird an Kabelpunkten innerhalb jedes Zeitfensters berechnet. Eine endgültige

Alarmentscheidung kann durch kontinuierliche Überwachung des Wasserfalls und Schätzung des Abstands über mehrere Zeitfenster hinweg getroffen werden. Ein Alarm wird ausgelöst, wenn der senkrechte Abstand der Vibrationsquelle zum Glasfaserkabel kürzer ist als der Schwellenwert (z.B. <5m zum Kabel) und auf einer Karte angezeigt wird.

[0029] Das System führt die folgenden Vorgänge durch.

P-1: Entfernung des Hintergrundverkehrs: Ein patchbasierter Medianfilter wird eingesetzt, um den Hintergrundverkehr zu entfernen.

P-2: Bild-Binarisierung: Als ein Anomalie Zustand, in dem eine Baustelle befindet, werden Signale durch die Berechnung ihrer Z-Score normalisiert, kann die erste binäre Entscheidung erhalten werden.

P-3: Erzeugen eines Intensitätsprofils: Generierung eines Intensitätsprofils der Schwingungen des Datensatzes bei jeder Entfernung unter Verwendung einer diskreten Wahrscheinlichkeitskarte (Kernel-Dichte und GPR).

P-4: Abstandsvorhersage: Die Bayes'sche Inferenz wird eingesetzt, um den Abstand der senkrechten Vibrationsquelle auf der Grundlage der kombinierten Wirkung der Intensität an den diagonalen Messpunkten und dem senkrechten Messpunkt zu bestimmen.

O-1: Anzeige: Zeigt Informationen über den Verlauf des Glasfaserkabels und die ermittelte Entfernung an, um die Ergebnisse für die Betreiber zu visualisieren. Basierend auf der Entfernungsbestimmung kann ein Alarm ausgelöst werden, der einen Techniker auffordert, die Aktivitäten vor Ort zu überprüfen/bestimmen.

[0030] Das Konzept des oben entwickelten Modells wurde sowohl an Glasfasern, die zu Forschungs- und Entwicklungszwecken erdverlegt werden, als auch an verschiedenen Glasfasern in Versorgungsnetzen an unterschiedlichen Standorten erfolgreich getestet.

[0031] Fig. 3(A) und Fig. 3(B) zeigen diskrete senkrechte Punkte eines faseroptischen Sensorkabels und einen Vergleich der Entfernungsschätzungen mit einer Wahrscheinlichkeitsdichtekarte für die gesammelten Daten gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung.

[0032] Wie aus dieser Abbildung ersichtlich ist, ist eine gemeinsame Wahrscheinlichkeit, die auf der Grundlage der gesammelten Daten in 12 senkrechten Abständen vom Kabel mit derselben Schwingungsquelle und den Schätzungen der in der Tabelle links dargestellten Methode ermittelt wurde, wünschenswert, da kein Parameter über die Wellenaus-

breitung in dem Gebiet, in dem der Test durchgeführt wurde, bekannt ist. In ähnlicher Weise werden die Ergebnisse der Entfernungsschätzung auf der Grundlage derselben Daten und der Verwendung der Kernel-Dichte-Methode zur Erzeugung der Wahrscheinlichkeitsdichte als kontinuierliche Alternative mit dem Binning-Ansatz als direkte Wahrscheinlichkeitsverteilungsmethode verglichen und in Fig. 4(A) und Fig. 4(B) dargestellt, die Diagramme zur Veranschaulichung einer kontinuierlichen Kernel-Dichte-Karte und einer diskreten Binning- und Verteilungskarte gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung sind.

[0033] Je nach erforderlicher Genauigkeit können kontinuierliche Funktionsansätze wie die Kernel-Dichte mit höherem Rechenaufwand implementiert werden. Im Allgemeinen liefert der diskrete Binning-Ansatz jedoch zufriedenstellende Ergebnisse bei geringeren Rechenkosten.

[0034] Zum weiteren Nachweis der Anwendbarkeit des entwickelten Modells wurde es mit in Betrieb befindlichen optischen Fasern von in Betrieb befindlichen Kabeln getestet, die in größerer Tiefe vergraben sind und im Allgemeinen größeren Unsicherheiten hinsichtlich der Bodenbedingungen unterliegen. Hier demonstrieren wir auch die Ergebnisse der Abschätzung des Abstands der Schwingungsquelle mit zwei Ansätzen, der diskreten Binning-Karte und der GPR-erweiterten kontinuierlichen Karte in Fig. 5 (A) und Fig. 5(B), die Box-Plots der Vorhersageergebnisse von Testdaten gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung zeigen.

[0035] Fig. 6 ist ein Flussdiagramm eines Gesamtverfahrens gemäß den Aspekten der vorliegenden Offenbarung. Mit Bezug auf diese Abbildung kann beobachtet werden, dass unser erfindungsgemäßes Verfahren zunächst die Messung und/oder Bestimmung eines normalen Basisschwingungspegels durch Straßen- oder anderen Verkehr oder Ereignisse und Ereignischarakteristika, wie z. B. Baueignisse, an verschiedenen rechtwinkligen Orten in Abständen von dem Glasfasersensorkabel einer verteilten Glasfaserverbindung, die als verteiltes Glasfasersensorsystem (DFOS) konfiguriert ist, umfasst.

[0036] Zweitens werden die Standorte der Glasfaser-Sensorkabel des DFOS-Systems einer geografischen Karte zugeordnet.

[0037] Drittens wird eine Datenbank mit Schwingungsintensitätsprofilen für jede senkrechte Position erstellt, wobei eine gemeinsame Wahrscheinlichkeitskarte mit einer Kernel-Dichte und einer Gaußschen Progressionsregression verwendet wird.

[0038] Viertens wird eine KI-Engine zur Ermittlung des Hintergrundverkehrs durch Medianfilterung eingesetzt.

[0039] Fünftens, wenn ein Vibrationssignal durch die Wirkung des Betriebs des DFOS-Systems erkannt wird, wird die AI-Engine ausgelöst, um den senkrechten Abstand der Vibrationsquelle vom faseroptischen Sensorkabel zu bestimmen.

[0040] Sechstens wird ein Alarm ausgelöst, wenn der ermittelte Abstand der senkrechten Schwingungsquelle zum faseroptischen Sensorkabel innerhalb eines vorgegebenen Schwellenwerts (d. h. ≤ 5 m) liegt, und auf einer Karte angezeigt, die den Alarm meldet.

[0041] Schließlich wird ein Anlagenbesitzer/Betreiber/Wartungsbetrieb auf der Grundlage der geografischen Karte zu dem Ort entsandt, um einen Faserschaden durch die nahe gelegene Vibrationsquelle zu vermeiden.

[0042] An dieser Stelle werden Fachleute die Nützlichkeit faseroptischer Sensortechnologien für die Ortung unterirdischer Glasfaserkabel, die Identifizierung von Bedrohungen für die Kabel - insbesondere von Bedrohungen, die sich senkrecht zur Glasfaser entwickeln - und damit die Verbesserung der Zuverlässigkeit von Infrastrukturen weiter schätzen. Wir können nun zum ersten Mal den Einsatz von faseroptischen Sensor- und maschinellen Lerntechnologien zur kontinuierlichen Überwachung von Umweltaktivitäten in einem in Betrieb befindlichen 5G-Transportnetz berichten und beschreiben. Innerhalb derselben Faser wie der laufende 5G-Telekommunikationsverkehr verarbeiten unsere intelligenten Erfassungssysteme Daten in Echtzeit und extrahieren nützliche Informationen für die Erkennung von Bedrohungen im Kabel, die Lokalisierung und die Verkehrserfassung. Die Ergebnisse des Erfassungsfelds bzw. -bereichs bieten einen ganzheitlichen Überblick über den Straßenverkehr und die Umweltbedingungen auf einer gesamten Strecke, was das Potenzial hat, saisonale Schwankungen bei Verkehrsstaus, Fahrzeugzahlen und Geschwindigkeiten zu erkennen.

[0043] Die feine zeitliche Auflösung und die niedrige Latenz ermöglichen es Verkehrsbetreibern, adaptive und präzise Verkehrsmanagementstrategien zu entwickeln, z. B. eine dynamische Streckenführung, um Staus zu vermeiden oder Unfälle zu reduzieren. Darüber hinaus können verschiedene Bedrohungen für Kabel vor Ort erkannt und lokalisiert werden, z. B. das Herabfallen von Masten, Bäumen oder Steinen, Straßenbauarbeiten und weit entfernte Vibrationsquellen. Die sofortige Meldung dieser Ereignisse kann den Selbstschutz des Kabels für die auf Faser-

erkennung basierenden Funktionen erleichtern und den Schutz der Anlagen erhöhen.

[0044] Vor-Ort-KI-Assistent Multi-Kontinuierliche-Abtast-Funktionen mit einer einzigen Faser werden durch die Erkennung der Intensitätsänderung der Rayleigh-Streuung mittels interferometrischer Phasenbeugung in der Faser ermöglicht. Die faseroptische Sensortechnologie erkennt alle Vibrationen in der Nähe des Faserkabels und erzeugt große Datensätze. Die lokale Verarbeitung der Daten mit Edge AI reduziert die Kosten für die Datenübertragung und -speicherung und erhöht den Datenschutz. Um eine solche kontinuierliche Erfassung zu erreichen, beschreiben wir unser Glasfaser-VTMS (Vehicle Traffic Monitoring System, Fahrzeugverkehr-Überwachungssystem) und unser Glasfaser-CS3 (Cable Safety Self-Protection System, Kabel-Sicherheits-Selbstschutz), die auf einer KI-Plattform vor Ort gehostet werden und ein hohes Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweisen.

[0045] Abb. 7 ist ein schematisches Diagramm, das ein solches „Many-in-One“-System zeigt, das an eine einzelne Feldfaser angeschlossen ist. Die gemeinsame Nutzung von Informationen zwischen Fiber-VTMS und Fiber-CS3 ermöglicht es uns, komplexe korrelierte Ereignisse zu entdecken und so Fehlalarme zu reduzieren. So können z. B. Straßenbauarbeiten als Ursache für Verkehrsstaus oder der Verantwortliche für einen Kabelschaden ermittelt werden. Die GPS-Koordinaten von erkannten Ereignissen können mit einem Kabelortungsmodul genau lokalisiert werden.

[0046] Faser-VTMS verwendet eine Faltungsnetwork-Architektur zur präzisen Segmentierung normaler Verkehrsmuster mit hoher Bildrate, und die Fahrzeugzahlen und Geschwindigkeiten werden in einem Nachbearbeitungsschritt bereitgestellt. Faser-CS3 holt sich Online-Informationen von Faser-VTMS und nutzt diese, um einen ortsspezifischen Schwellenwert für die Erkennung von Anomalien in einem bestimmten Zeitfenster festzulegen.

[0047] Starke Vibrationspunkte werden zunächst von einem Ausprägungs (Saliency)-Detektor erkannt, und die Punkte, die bei Faser-VTMS nicht dem normalen Verkehr zuzuordnen sind, werden in Fiber-CS3 eingespeist. Dementsprechend werden die dichten räumlich-zeitlichen Erfassungsdaten auf ein spärliches Format reduziert, so dass die Erkennung von Anomalien on-the-fly mit geringer Latenzzeit erfolgen kann. Der Bedrohungsgrad des erkannten anomalen Ereignisses wird auf der Grundlage von Zeit-Frequenz-Darstellungen weiter bewertet. Der Standort der erkannten Ereignisse entlang des Kabels kann auf der Karte genau lokalisiert werden. Zusammenfassende Ergebnisse auf hoher Ebene

werden im Ereignisprotokoll für zukünftige Analysen gespeichert.

[0048] Wir haben unser erfindungsgemäßes Verfahren und System an einem Feldversuchsstandort im 5G-Netz eines Betreibers in Long Beach Island (LBI), NJ, USA, evaluiert. Das Überwachungskabel ist 19 km lang und besteht aus Luftkabeln auf den ersten 2 km und den restlichen 17 km Erdkabeln (40-60 Zoll tief vergraben) auf der ganzen Insel. In diesem Versuch wird ein verteiltes akustisches Abfrage-/Analyse-/AI-System (Distributed Acoustic Sensing, DAS) verwendet, das an einem abgelegenen Standort platziert wird, um eine Verbindung zur Feldfaser für eine kontinuierliche Echtzeit- und Langzeitüberwachung (>7 Monate) herzustellen.

[0049] In unserem Feldversuch konnten wir die entdeckten abnormen Aktivitäten (sowohl von Luft- als auch von Erdkabeln) ermitteln und auf einer Evidenzkarte darstellen. In unseren früheren Versuchen wurde der Bedrohungsgrad von Kabeln durch Frequenzabschwächungsmechanismen in den Feldexperimenten bestimmt. Hier wurde die Methode zum ersten Mal durch Feldversuche validiert. Abnormale Werte weisen auf ein hohes Risiko hin, bei dem das Glasfaserkabel durchtrennt oder anderweitig beschädigt werden könnte. Wie wir festgestellt haben, können solche Ereignisse mit Hilfe der faseroptischen Sensortechnologie sofort nach ihrer Feststellung an einen Netzbetreiber gemeldet werden, um Ausfallzeiten der Kommunikationsnetze zu vermeiden bzw. zu verringern.

[0050] Anhand der im Feldversuch gesammelten Daten wurde eine Pilotstudie zur Abschätzung des Abstands zwischen Quelle und Kabel erfolgreich durchgeführt. Dabei wurde ein vibrierendes Gerät verwendet, um Maschinenmotorgeräusche aus Entfernungen von 1,8 bis 11 m zum Kabel zu emulieren, wobei der Abstand mindestens 0,9 m betrug. Die aktive Abdeckung betrug etwa 65,2 m entlang des Kabels. Aus den gesammelten Daten wurde jeder Messpunkt entlang des Kabels (insgesamt 41 Punkte) in der Mitte (Punkt 21) senkrecht vom erdverlegten Kabel abgesetzt. Die Intensitäten der Messpunkte variieren mit einem klaren symmetrischen Muster, wobei die Intensität am Mittelpunkt durchweg höher ist und an den weiter entfernten Messpunkten (dunklere Bereiche) proportional abnimmt.

[0051] Es wurde ein probabilistisches Modell entwickelt, das auf der geschätzten gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsverteilung von Abstand und Intensität basiert. Das Modell zeigte eine gleichbleibend hohe Leistung bei der Vorhersage der Abstände von Vibrationsquellen zum Glasfaserkabel. Die Mittelwert- und Medianindikatoren zeigten eine hohe Genauigkeit für

die Vorhersagen bei den meisten Entfernungen zum Kabel.

[0052] Als Ergebnis haben wir erfolgreich die Koexistenz von Kabelsicherheits-Selbstschutz-, Ereignislokalisierungs- und Verkehrsüberwachungsanwendungen unter Verwendung eines DAS mit einer einzigen Standardfaser im operativen 5G-Transportnetz demonstriert. Das kontinuierliche Überwachungssystem arbeitet in Umgebungen mit Schwankungen, die durch verschiedene Umweltfaktoren (z. B. Wetter und Bodenbeschaffenheit) verursacht werden, und basiert auf Selbstnormalisierung. Die KI-Plattform vor Ort gewährleistet eine niedrige Latenzzeit, damit rechtzeitig Maßnahmen ergriffen werden können. Die Fasersensorik bietet eine einzigartige Lösung für den Selbstschutz von Kabeln, ohne dass weitere Sensoren eingeführt werden müssen, was für die Unterstützung anderer missionskritischer 5G-Anwendungen und darüber hinaus sehr nützlich ist. Die Ergebnisse des Feldversuchs zeigen, dass die verteilte Glasfasererfassung mit KI vor Ort sowohl für Netzbetreiber als auch für Drittkunden (z. B. Verkehrsbetriebe) zusätzliche Werte schaffen kann, die für künftige Anwendungen in den Bereichen intelligenter Verkehr, sicherere Stadt und Smart City oder für die Überwachung in dünn besiedelten, ländlichen Gebieten, in denen Glasfaserkabel verlegt sind, von großem Potenzial sind.

[0053] An dieser Stelle haben wir diese Offenbarung zwar anhand einiger spezifischer Beispiele dargestellt, doch wird der Fachmann erkennen, dass unsere Lehren nicht so beschränkt sind. Dementsprechend sollte diese Offenbarung nur durch den Umfang der beigefügten Ansprüche begrenzt werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Systems mit verteilter faseroptischer Abtastung (DFOS) / verteilter akustischer Abtastung (DAS) zur Bestimmung der senkrechten Entfernung(en) zu Vibrationsquellen, wobei das Verfahren Folgendes umfasst:
 - Betrieb des DAS-Systems zur Messung von Basisschwingungspegeln und Ereigniseigenschaften an verschiedenen senkrechten Stellen einer abtastenden optischen Faser, die Teil des DAS-Systems ist;
 - Integration der gemessenen Basisschwingungspegel und der jeweiligen Standorte entlang der sendenden optischen Faser in eine geografische Karte;
 - Erstellung einer Datenbank mit Schwingungsintensitätsprofilen an jeder senkrechten Stelle;
 - Bestimmung der Hintergrundvibrationen des Verkehrs in der Datenbank der Vibrationsintensitätsprofile und Entfernung derselben gemäß einer Median-Filterungsmethode;
 - Erfassen einer Vibration durch die Wirkung des DAS und Bestimmen einer senkrechten Entfernung einer

Quelle der erfassten Vibration von der abtastenden optischen Faser.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Bestimmung des senkrechten Abstands aus einem DFOS-Strom von Wasserfalldiagrammen erfolgt, die aus dem Betrieb des DAS-Systems resultieren.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die Bestimmung des senkrechten Abstands eine Bildbinarisierung des Stroms von Wasserfalldiagrammen umfasst.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die Bestimmung des senkrechten Abstands das Erzeugen eines Intensitätsprofils an jeder senkrechten Stelle unter Verwendung einer Verbindungswahrscheinlichkeitskarte durch einen Kernel-Dichte- oder Gauß-Prozess-Regressionsprozess (GPR) umfasst.

5. Das Verfahren nach Anspruch 4 umfasst ferner das Erzeugen und Ausgeben eines Alarms, wenn der ermittelte senkrechte Abstand eine vorher festgelegte Alarmschwellenbedingung erfüllt.

Es folgen 10 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

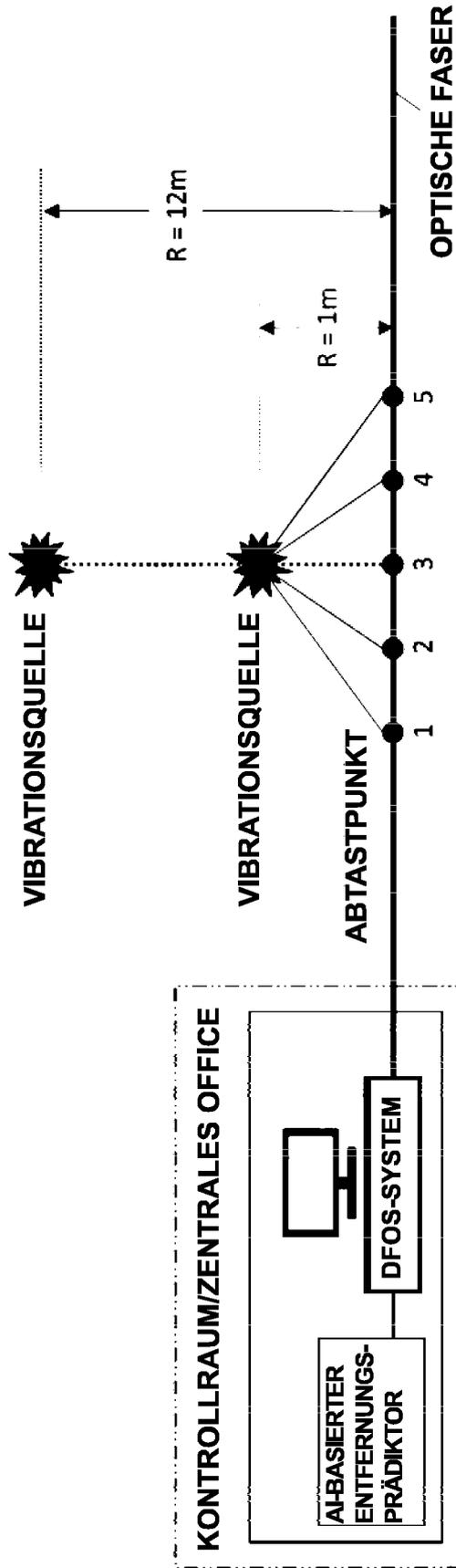


FIG. 1

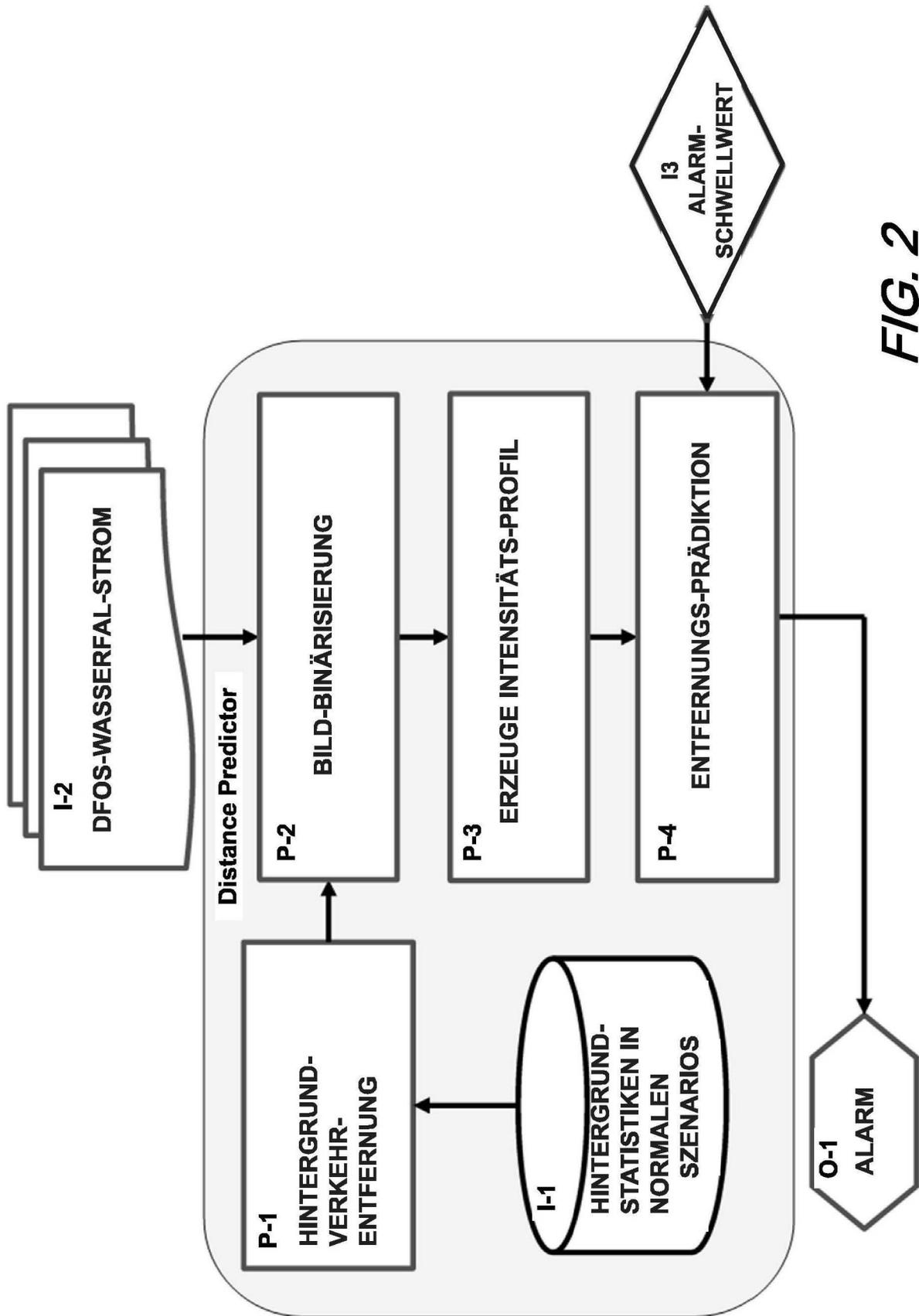


FIG. 2

GRUND- WAHRHEIT (m)	ABSCHÄT- ZUNG
1	1 + 1.6 m
2	2 + 2.3 m
3	3 + 2.4 m
4	4 + 0.3 m
5	5 + 1.0 m
6	6 + 0.2 m
7	7 + 0.6 m
8	8 + 0.7 m
9	9 + 0.0 m
10	10 + 1.6 m
11	11 + 0.2 m
12	12 + 1.0 m

FIG. 3(A)

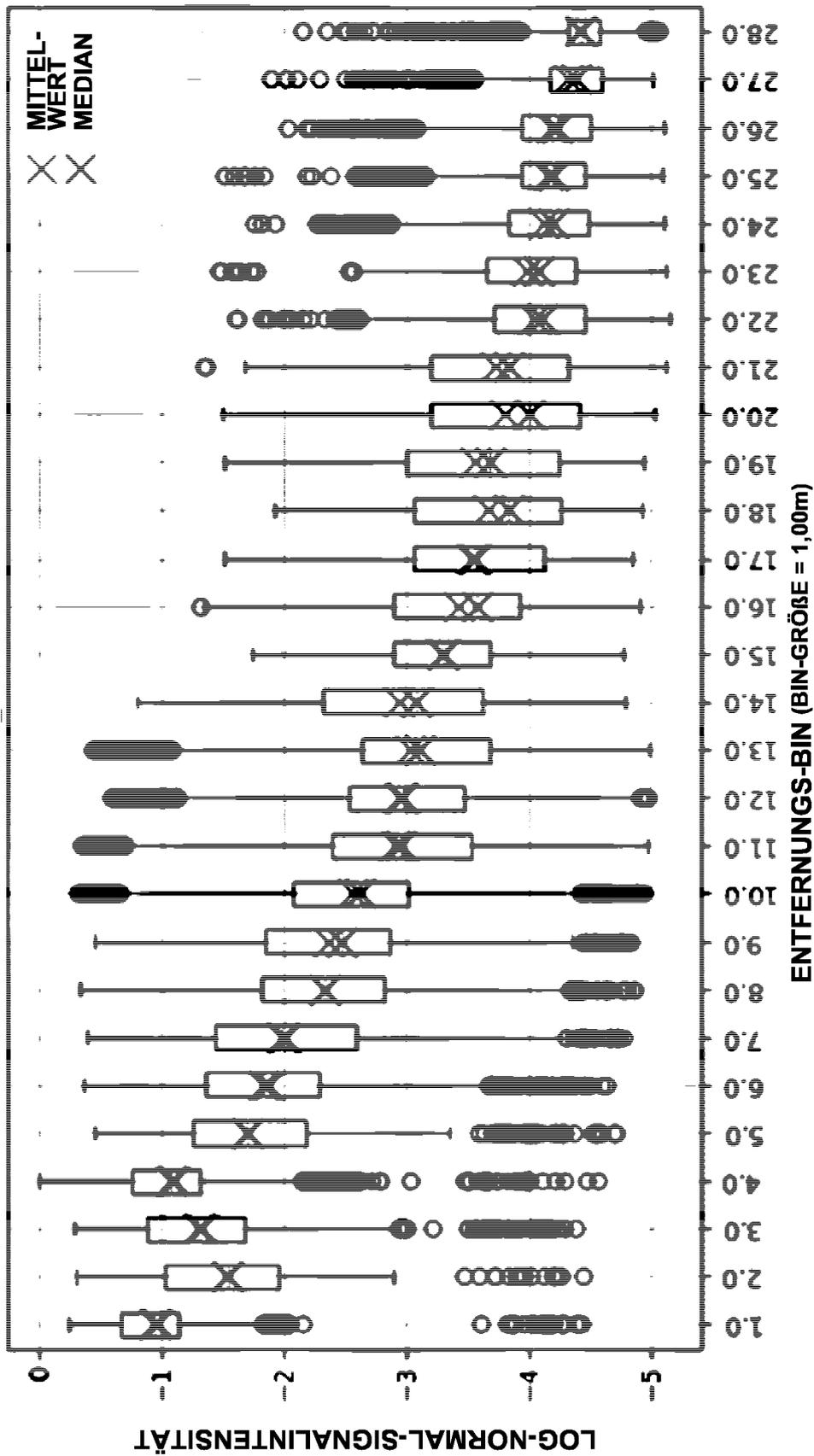


FIG. 3(B)

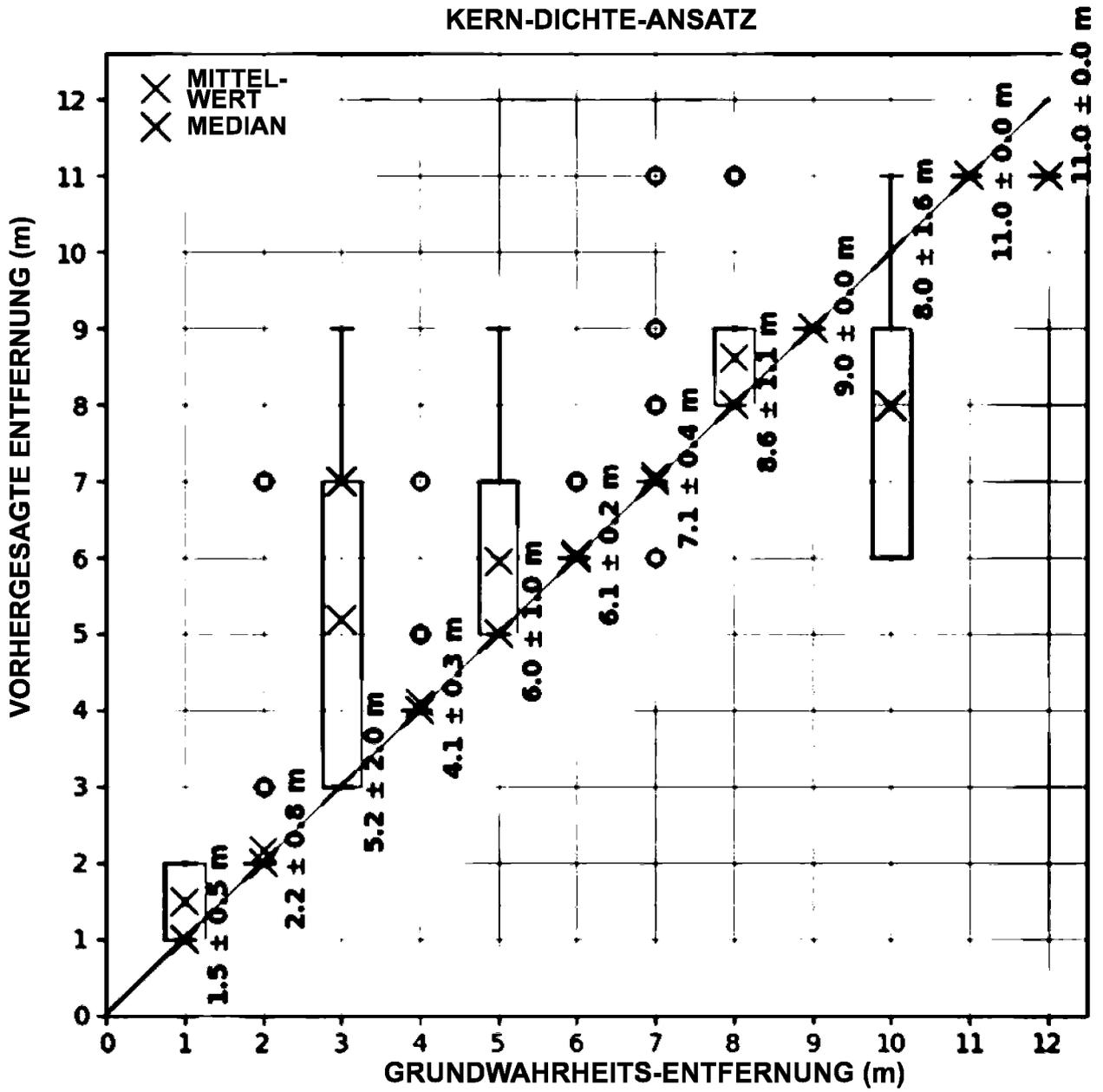


FIG. 4(A)

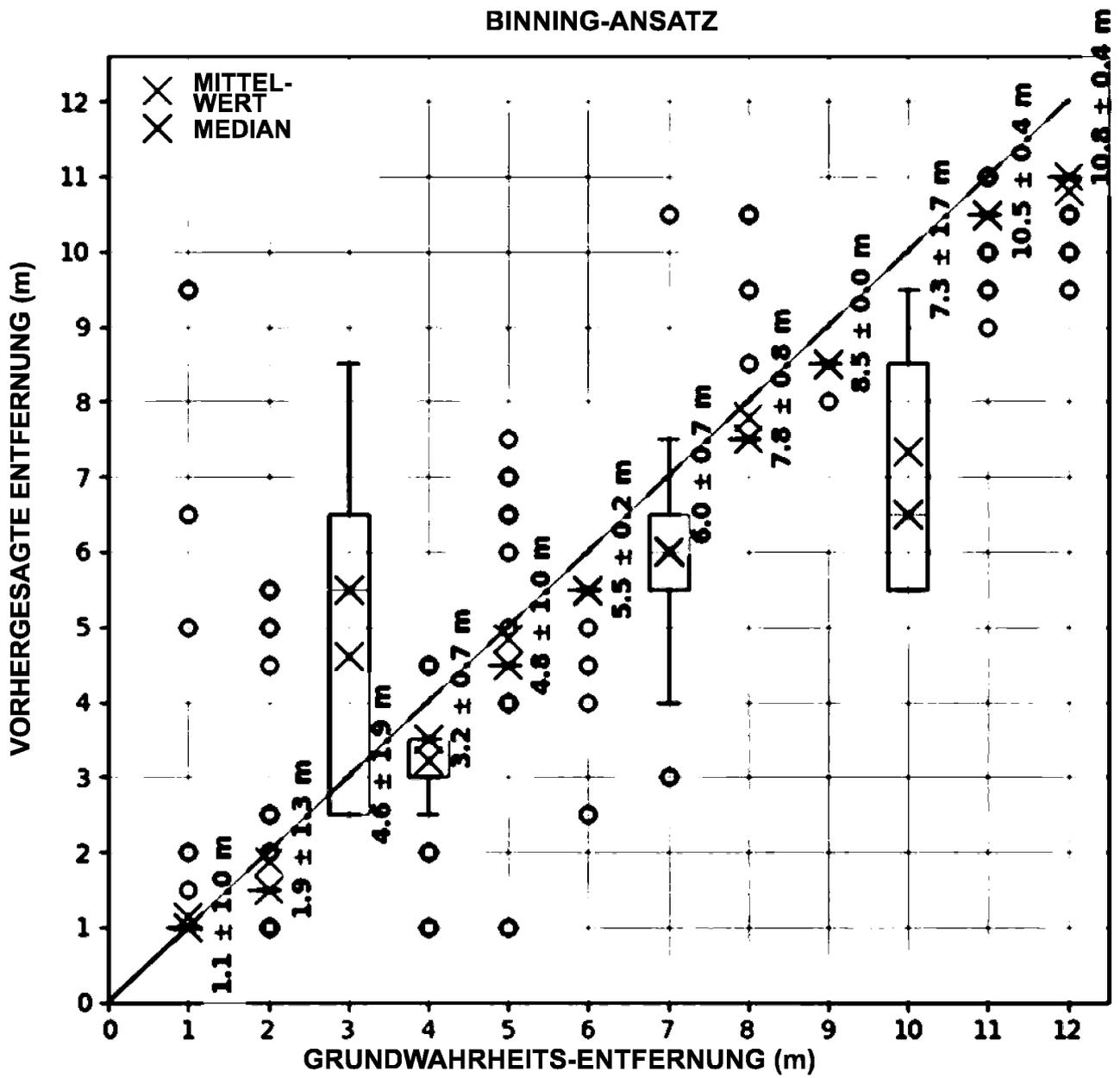


FIG. 4(B)

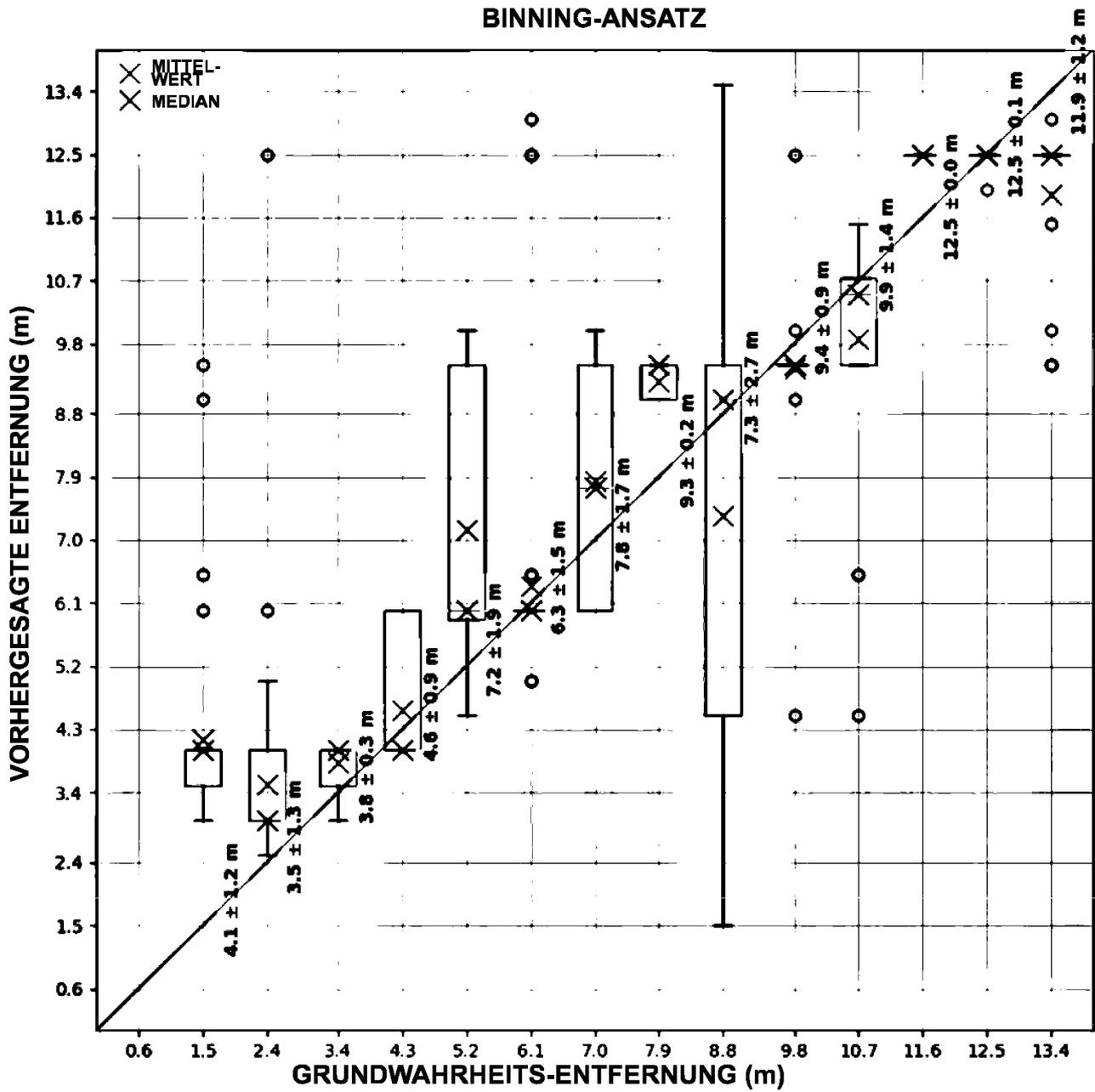


FIG. 5(A)

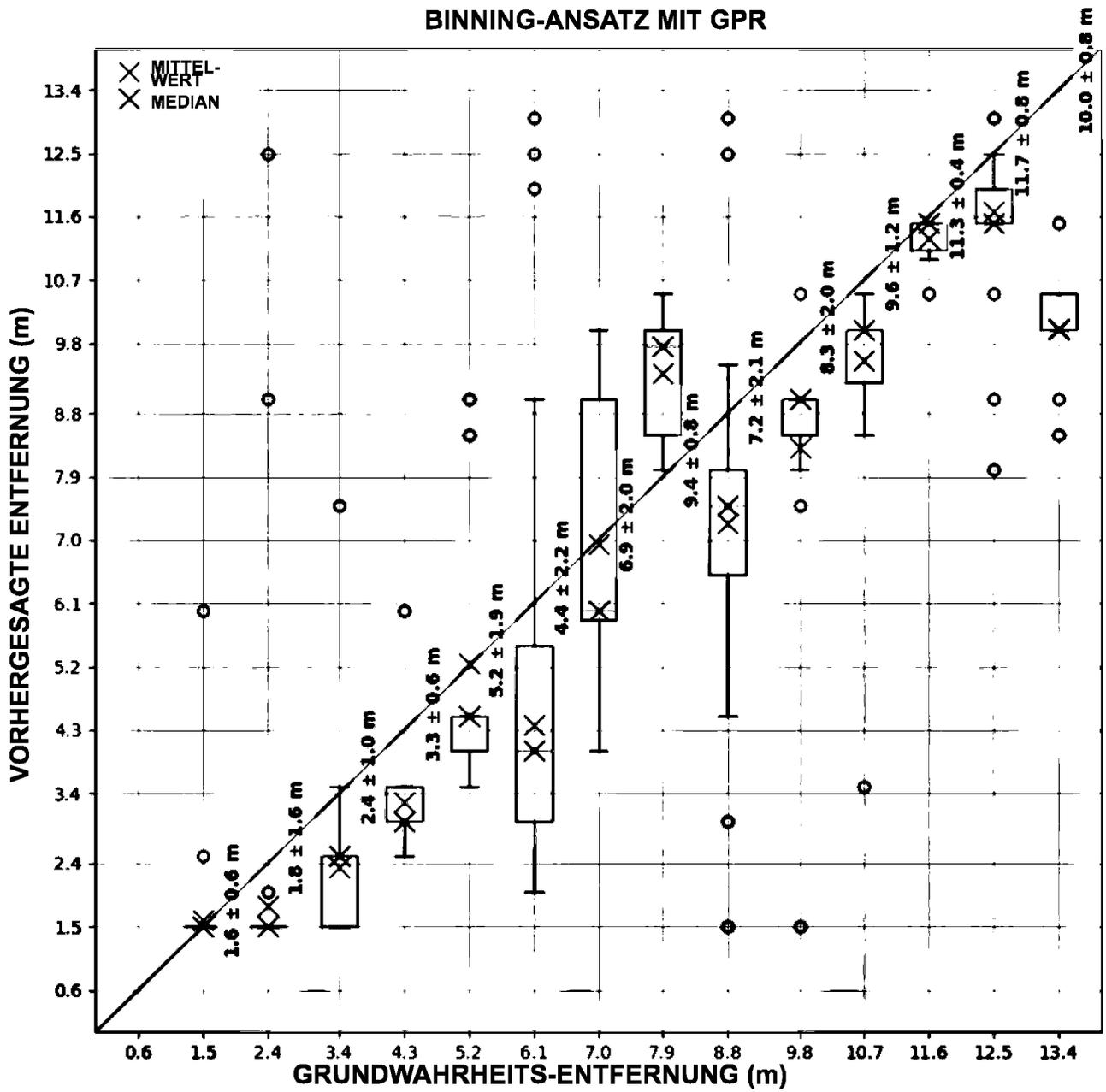


FIG. 5(B)

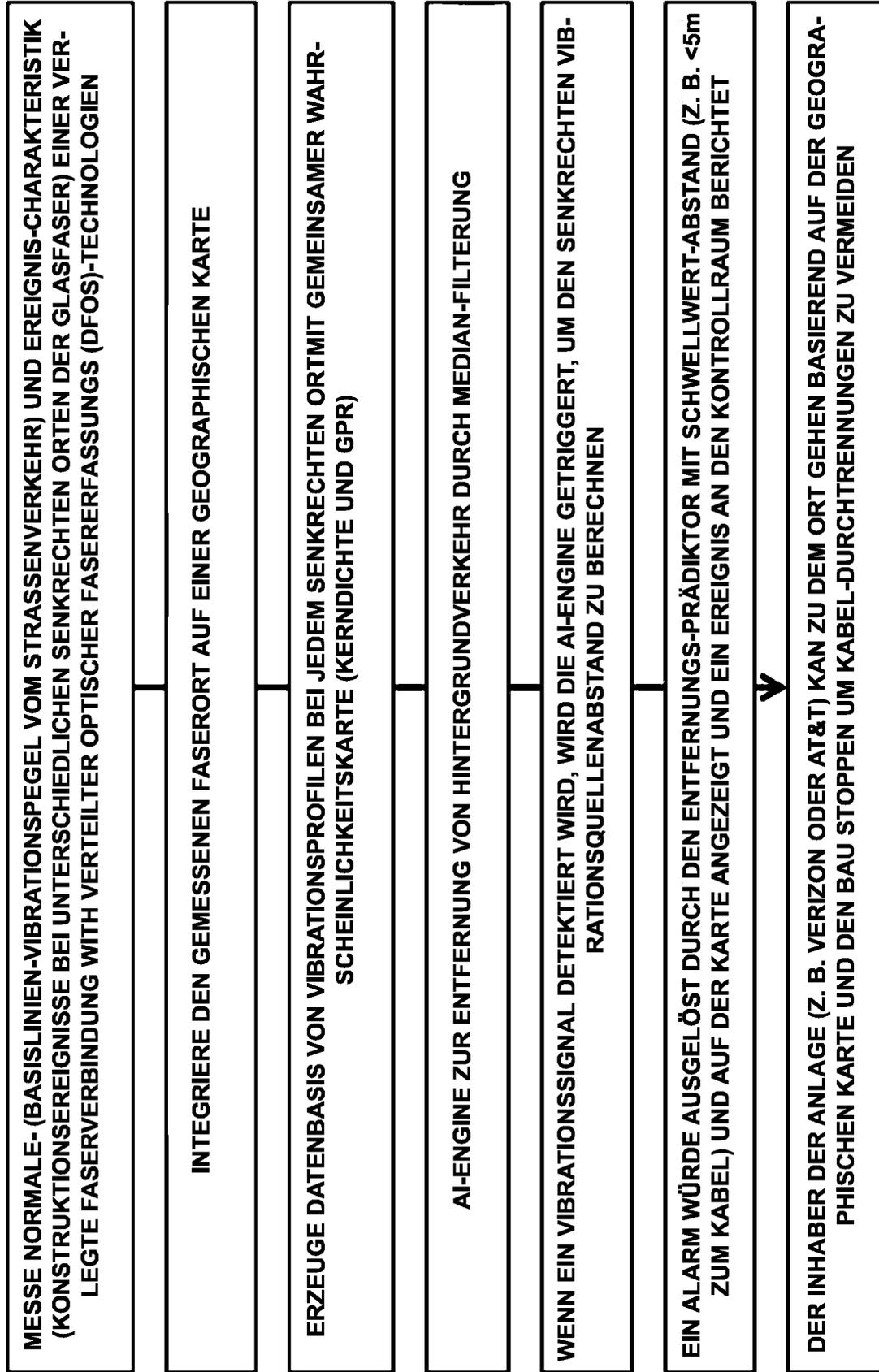


FIG. 6

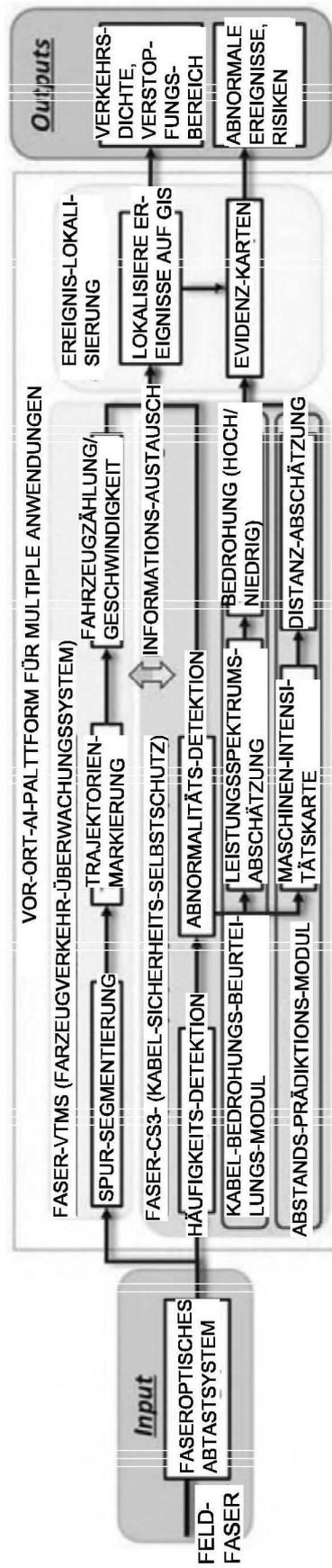


FIG. 7