



(19)  
 Bundesrepublik Deutschland  
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 10 2007 011 964 A1 2008.09.11

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2007 011 964.1

(22) Anmeldetag: 09.03.2007

(43) Offenlegungstag: 11.09.2008

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: G01H 9/00 (2006.01)

(71) Anmelder:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,  
 51147 Köln, DE

(72) Erfinder:

Bittner, Michael, Dr., 86929 Penzing, DE; Höppner,  
 Kathrin, Dipl.-Geogr., 82319 Starnberg, DE; Wüst,  
 Sabine, Dipl.-Math., 82110 Germering, DE

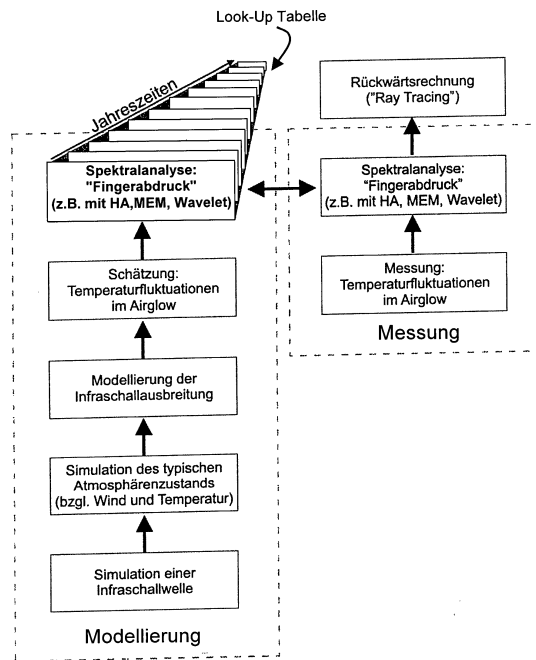
(74) Vertreter:

Kirschbaum, A., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 82110  
 Germering

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Mustererkennungsverfahren zur Früherkennung von infraschallwirksamen Ereignissen**

(57) Zusammenfassung: Bei einem Mustererkennungsverfahren zur Früherkennung von infraschallwirksamen Ereignissen werden Periodogramme aus zeitlich hochaufgelösten, mittels bodengebundener Messinstrumente standardisiert und kontinuierlich gemessenen Temperaturfluktuationen im Airglow analysiert. Ein aus den Periodogrammen ermittelter, sogenannter spektraler Fingerabdruck wird mit einem in einer Look-Up-Tabelle abgelegten, sogenannten spektralen Fingerabdruck von Periodogrammen aus modellbasierten Infraschallausbreitungssimulationen verglichen. Bei einer signifikanten Ähnlichkeit zwischen Strukturen der Periodogramme aus den Zeitreihen der gemessenen und der simulierten Temperaturfluktuationen wird eine Rückwärtsberechnung der Infraschallausbreitung in der oberen Mesosphäre zum Erdboden mit Hilfe eines Infraschallausbreitungsmodells (Ray-Tracing) durchgeführt. Hierdurch ist dann der Ort einer Infraschallquelle ermittelt. Für ein kritisches, potentiell gefährdetes Gebiet wird fortwährend eine Infraschallausbreitung simuliert und der mittels Spektralanalyseverfahren ermittelte charakteristische, sogenannte spektrale Fingerabdruck wird in der Look-Up-Tabelle abgelegt.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Mustererkennungsverfahren zur Früherkennung von infraschallwirksamen Ereignissen.

**[0002]** Derartige Ereignisse, wie beispielsweise Tsunamis, Erdbeben, größere Explosionen, vulkanische Aktivitäten, ausgeprägte Sturmsysteme, Meeresbrandung, Gezeiten, Polarlichtaufbrüche, in die Atmosphäre einfliegende Meteoriten, Überschallknall etwa durch Flugzeuge, Windkraftanlagen, produzierten Infraschall. Bei Infraschall handelt es sich um eine Abfolge von Kompressionen und Expansionen von Luftpaketen. Dies hat jeweils eine Erwärmung und Abkühlung der Luft zur Folge, d. h. Infraschall kann über die Messung von Temperaturfluktuationen nachgewiesen werden.

**[0003]** Infraschall kann sich in der Atmosphäre über weite Strecken, horizontal über einige 1000 Kilometer sowie vertikal über bis zu etwa 200 Kilometern, in alle Richtungen ausbreiten. Über den Infraschall können daher die oben angeführten Ereignisse auch noch in großer Entfernung erkannt werden.

**[0004]** Da die Luftdichte mit zunehmender Höhe über viele Größenordnungen gemäß der barometrischen Höhenformel abnimmt, verstärkt sich das Infraschallsignal mit zunehmender Höhe und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis nimmt zu. Die Atmosphäre wirkt somit als „natürlicher Signalverstärker“. Messungen von Infraschall in den oberen Atmosphärenschichten können daher als besonders effektiv zum eindeutigen und zuverlässigen Nachweis von Infraschall angesehen werden. Die Schwingungsdauern von Infraschall bewegen sich typischerweise im Bereich von wenigen Sekunden bis zu etwa fünf Minuten.

**[0005]** Zuverlässige Messungen der Temperatur mit hoher zeitlicher Auflösung sind insbesondere mit bodengebundenen Messinstrumenten, wie beispielsweise IR-Spektrometern, Photometern, Imagern möglich, mittels welcher der so genannte Airglow beobachtet wird. Der Airglow ist eine leuchtende Schicht im Höhenbereich der oberen Mesosphäre/unteren Thermosphäre in einer Höhe von etwa 80 bis 100 km. Solche Messungen sind besonders geeignet zur Detektion von Infraschall und daher prädestiniert etwa als Komponente eines gegenwärtig von den Vereinten Nationen geplanten Multi-Hazard-Frühwarnsystems.

**[0006]** Die Analyse von Fluktuationen geophysikalischer Parameter, wie beispielsweise Druck, Temperatur, wird in der Meteorologie und der Atmosphärenphysik seit vielen Jahren zur Untersuchung dynamischer Strukturen auf verschiedenen raumzeitlichen Skalen, wie beispielsweise Turbulenz, Infraschallwellen,

Schwerewellen oder planetare Wellen angewendet. Hierzu werden auch Zeitreihen von Temperaturfluktuationen verwendet, wie sie mit den vorstehend angeführten bodengebundenen Messinstrumenten, die den Airglow beobachten, gewonnen werden. Hierbei kommen Zeitreihen-Analyseverfahren verschiedenster Komplexität, wie beispielsweise Harmonische Analyse (HA), Maximum Entropie Methode (MEM), Wavelet Analyse (WA), zum Einsatz.

**[0007]** Die Theorie der Infraschallausbreitung in der Atmosphäre gilt seit vielen Jahren als gut ausgearbeitet. Es existieren heute verschiedene numerische Verfahren zur Modellierung der Ausbreitung von Infraschall in der Atmosphäre, beispielsweise HARPA, Inframap. Zeitreihen von Temperaturfluktuationen im Airglow der Atmosphäre können mit verschiedenen Methoden der Zeitreihenanalyse hinsichtlich der Präsenz von Infraschall untersucht werden. Die Vielzahl der eingangs angeführten Infraschallquellen hat eine Überlagerung von unterschiedlichen Infraschallsignaturen zur Folge. Dies führt zu äußerst komplexen Strukturen in den Periodogrammen, wodurch deren Interpretation erheblich erschwert wird. Dies ist jedoch für eine zuverlässige Frühwarnung unabdingbar.

**[0008]** Aufgabe der Erfindung ist es, ein Mustererkennungsverfahren zur Früherkennung von infraschallwirksamen Ereignissen anzugeben, mit welchem gemessene Infraschallsignaturen aus den Temperaturfluktuationen im Airglow der Atmosphäre eindeutig, schnell, vollautomatisch und zuverlässig etwa in Echtzeit der jeweiligen Infraschallquelle zugeordnet werden können. Gemäß der Erfindung ist diese Aufgabe bei einem Mustererkennungsverfahren durch die Merkmale im kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand von Unteransprüchen.

**[0009]** Damit ein Mustererkennungsverfahren zur schnellen und zuverlässigen Detektion von Infraschallsignaturen eingesetzt werden kann, die durch die eingangs angeführten Infraschallquellen generiert werden, basiert das erfindungsgemäße Mustererkennungsverfahren auf zeitlich hoch aufgelösten Messungen von Temperaturfluktuationen, die mit bodengebundenen Instrumenten, die den sogenannten Airglow messen, kontinuierlich standardisiert und über einem festen Ort, dem Aufstellungsort des Messinstruments, aufgezeichnet werden. Hierfür wird eine Kombination aus statistisch und physikalisch motivierten Ansätzen verwendet.

**[0010]** Periodogramme aus Zeitreihen der gemessenen Temperaturfluktuationen im Frequenzbereich des Infraschalls werden ständig mit entsprechenden Periodogrammen aus modellbasierten Simulationen verglichen. Simuliert wird hierbei ständig eine zu erwartende Temperaturfluktuation, wie sie beispielsweise

weise durch ein typisches Tsunami-Ereignis verursacht wird. Einer solchen Simulation liegt die Ausbreitung von Infraschall in der Atmosphäre zugrunde.

**[0011]** Dabei wird jeweils der aktuelle dynamische Hintergrundzustand der Atmosphäre berücksichtigt, wie beispielsweise großräumige Wind- und Temperaturverteilungen. Hierzu wird ein numerisches Atmosphärenmodell, wie beispielsweise GME, ECM-WF-Modell, NOAA-GFS, für die jeweils betrachtete geographische Region eingesetzt. Liegt eine signifikante Ähnlichkeit der Periodogramme aus den Zeitreihen der gemessenen und der simulierten Temperaturfluktuationen vor, so ist dies eine deutliche Indikation für ein Ereignis. Der Ort der Infraschallquelle wird über ein Infraschall-Ausbreitungsmodell, das sogenannte "Ray Tracing", bestimmt.

**[0012]** Die Wellenlängen von Infraschall mit Schwingungsdauern zwischen etwa 5 Minuten und 0,1 Sekunden liegen somit zwischen etwa 1000 km und 30 m. Solche Infraschallwellen werden in der Atmosphäre nur sehr schwach absorbiert und können sich daher über große Entfernungen ausbreiten. Ferner wächst die Amplitude einer am Erdboden verursachten Infraschallwelle mit zunehmender Höhe aufgrund des exponentiell abnehmenden Luftdrucks an. Die mit dieser Infraschallwelle verbundenen Temperaturfluktuationen bewirken eine Modulation des sogenannten „Airglows“, welcher, wie bereits ausgeführt, vom Boden aus mit verschiedenen Instrumenten mit hoher zeitlicher Auflösung gemessen werden kann.

**[0013]** Es gibt eine Vielzahl von Infraschall verursachenden Ereignissen, die eine individuelle Signatur im Infraschall erzeugen und damit ihren eigenen „spektralen Fingerabdruck“ haben. Dies wiederum bedeutet, dass die gemessenen Zeitreihen von Temperaturfluktuationen im Airglow der Atmosphäre eine Vielzahl von einander überlagerten Infraschallsignaturen aufweise.

**[0014]** Entscheidend bei dem erfindungsgemäßen Mustererkennungsverfahren ist die Diskriminierung der verschiedenen Infraschall-Signalquellen etwa in Echtzeit. Das bedeutet, dass während der Aufzeichnung von Messungen praktisch zeitgleich der Prozess der Mustererkennung läuft, mit der Möglichkeit, dass sehr schnell bei akutem Verdacht reagiert werden kann. Ein solches Mustererkennungsverfahren ist die Voraussetzung für den Einsatz solcher Messsysteme in einem Multi-Hazard-Frühwarnsystem.

**[0015]** Nachfolgend wird die Erfindung anhand eines Ablaufdiagramms eines Mustererkennungsverfahrens schematisch veranschaulichen.

**[0016]** Bei dem Mustererkennungsverfahren werden verwendet:

a) statistische Kenngrößen, wie beispielsweise

der Standardabweichungen, die eine übergeordnete Kennzeichnung der aktuellen Stärke der Fluktuationen erlauben,

b) Spektralanalyseverfahren, wie beispielsweise die Harmonische Analyse (HA), die Maximum Entropie Methode (MEM) oder die Wavelet Analyse (WA), die eine Charakterisierung des jeweiligen spektralen Musters der Zeitreihe zum Zeitpunkt der aktuellen Messung ermöglichen und

c) eine Modellierung der Ausbreitung des Infraschalls in der Atmosphäre für jeweils typische Infraschall-Quellensignale, beispielsweise Beben, Explosion, Vulkan, um die potentiell erwarteten Temperaturfluktuationen im Airglow hinsichtlich ihrer Frequenz und ihrer Amplitude zu kennzeichnen („spektraler Fingerabdruck“).

**[0017]** Die Infraschallausbreitung wird dabei jeweils für ein sensibles, d. h. potentiell gefährdetes Gebiet simuliert. Der charakteristische „Fingerabdruck“ wird in einer „Look-Up-Tabelle“ abgelegt. Hierzu wird der mittlere Atmosphärenzustand hinsichtlich Wind- und Temperaturverteilung mit einem Atmosphärenmodell geschätzt, da die Ausbreitung des Infraschalls von den jeweiligen Temperatur- und Windverhältnissen abhängt. Hierbei ist die mittlere Temperatur- und Windverteilung eine Funktion der Jahreszeit, was in der Look-Up-Tabelle berücksichtigt wird.

**[0018]** In besonders kritischen Gebieten wird darüber hinaus fortwährend ein Ereignis, beispielsweise ein Beben, simuliert und die Ausbreitung des Infraschalls in einer möglichst realistisch geschätzten Atmosphäre bezüglich Temperatur- und Windverteilung berechnet. In diesem Fall handelt es sich um eine Echtzeitsimulation.

**[0019]** Die tatsächlichen, im Airglow gemessenen Temperaturfluktuationen werden permanent und kontinuierlich spektral analysiert. Der so ermittelte spektrale Fingerabdruck der echten Temperaturfluktuationen wird ständig zusammen mit dem spektralen Fingerabdruck der simulierten Daten aus der Look-Up-Tabelle bzw. gegebenenfalls mit der Echtzeitsimulation verglichen. Für die Spektralanalyse wird dabei jeweils eine Kombination verschiedener Verfahren verwendet, wie beispielsweise Wavelet-Analyse, Maximum Entropie Methode, Harmonische Analyse.

**[0020]** Ergibt der Mustervergleich eine signifikante Ähnlichkeit der Strukturen, so besteht ein akuter Verdacht auf ein vorliegendes infraschallwirksames Ereignis. In diesem Fall erfolgt eine Rückwärtsrechnung der Infraschallausbreitung von der oberen Mesosphäre zum Erdboden mit Hilfe eines Infraschallausbreitungsmodells („Ray Tracing“). Auf diese Weise wird die Abschätzung der geographischen Lage der Infraschallquelle für das registrierte Infraschallsignal erhalten.

**[0021]** Gegenwärtig werden im Auftrag der Vereinten Nationen von verschiedenen Institutionen Konzepte für den Aufbau globaler sogenannter „Multi-Hazard-Frühwarnsysteme“ erarbeitet. Diese Systeme sollen möglichst zuverlässig arbeiten, d. h. Fehlalarme sollen wegen der potentiellen erheblichen volkswirtschaftlichen Auswirkungen möglichst vermieden werden. Aus diesem Grunde wird die Warnung vor einem Ereignis immer auf der Analyse verschiedener und voneinander unabhängiger Sensornetzwerke beruhen. Die Nutzung von Infraschallbeobachtungen im Airglow kann daher eine wichtige Komponente in einem solchen zukünftigen Frühwarnsystem darstellen.

### Patentansprüche

1. Mustererkennungsverfahren zur Früherkennung von infraschallwirksamen Ereignissen, **dadurch gekennzeichnet**, dass Periodogramme aus zeitlich hochaufgelösten mittels bodengebundener Messinstrumente standardisiert und kontinuierlich gemessenen Temperaturfluktuationen im Airglow analysiert werden, ein aus den Periodogrammen ermittelter, sogenannter spektraler Fingerabdruck mit einem in einer Look-Up-Tabelle abgelegten, sogenannten spektralen Fingerabdruck von Periodogrammen aus modellbasierten Infraschallausbreitungssimulationen verglichen wird und bei einer signifikanten Ähnlichkeit zwischen Strukturen der Periodogramme aus den Zeitreihen der gemessenen und der simulierten Temperaturfluktuationen eine Rückwärtsberechnung der Infraschallausbreitung in der oberen Mesosphäre zum Erdboden mit Hilfe eines Infraschall-Ausbreitungsmodells (Ray-Tracing) durchgeführt wird und dadurch der Ort einer Infraschallquelle ermittelt ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass für ein kritisches, potentiell gefährdetes Gebiet fortwährend eine Infraschallausbreitung simuliert wird und dieser mittels Spektralanalyseverfahren ermittelte charakteristische, sogenannte spektrale Fingerabdruck in der Look-Up-Tabelle abgelegt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der mittlere Atmosphärenzustand hinsichtlich von der jeweiligen Jahreszeit abhängiger Wind- und Temperaturverteilungen mit Hilfe eines Atmosphärenmodells geschätzt und in die Infraschallausbreitungsmodellierung mit eingeht.

4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass statistische Kenngrößen (statistische Momente) berücksichtigt und in der Look-Up-Tabelle abgelegt werden.

5. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch

gekennzeichnet, dass Spektralanalyseverfahren zur Charakterisierung eines spektralen Musters einer Zeitreihe zum Zeitpunkt einer Messung durchgeführt werden.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass als Spektralanalyseverfahren eine Harmonische Analyse (HA), die Maximumentropie-Methode (MEM) oder die Wavelet-Analyse (WA) oder Kombinationen dieser Spektralanalyseverfahren durchgeführt werden.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

