

(12)

Österreichische Patentanmeldung

(21)

Anmeldenummer:

A 50824/2022

(22)

Anmeldetag:

25.10.2022

(43)

Veröffentlicht am:

15.02.2024

(51)

Int. Cl.:

E01B 35/06

E01B 35/00

E01B 27/00

G06F 17/10

G06F 17/14

(2006.01)

(2006.01)

(2006.01)

(2006.01)

(2006.01)

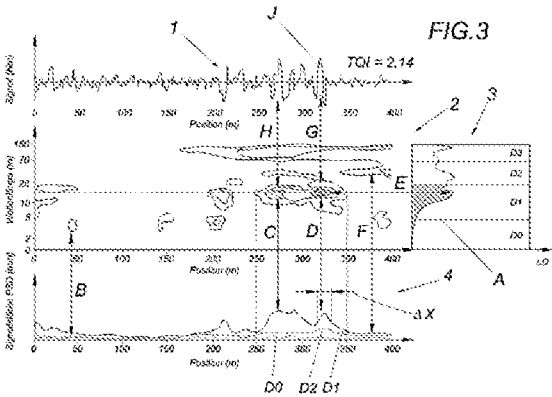
(56) Entgegenhaltungen: CN 111979859 A CN 104032629 B CN 104947555 A	(71) Patentanmelder: HP3 Real GmbH 1130 Wien (AT) (72) Erfinder: Lichtberger Bernhard Dr. 1030 Wien (AT) (74) Vertreter: Hübscher & Partner Patentanwälte GmbH 4020 Linz (AT)
--	---

(54)

Verfahren zur automatischen Auswertung von Gleismessdaten

(57)

Es wird ein Verfahren zur automatischen Auswertung von Gleismessdaten (1) der Gleisgeometrie und/ oder des Schotterbettes mit einer Recheneinrichtung beschrieben. Um eine automatische Generierung von Vorschlägen zur Behebung der Gleisfehler zu ermöglichen, wird vorgeschlagen, dass zunächst eine einem Gleisabschnitt zugeordnete Messreihe der auszuwertenden Gleismessdaten (1) mit einer Mehrzahl an Wavelets unterschiedlicher Wellenlängen Wavelet transformiert wird und aus diesen Wavelet transformierten eine Art Wärmebild, in dem die Wellenlänge über der Position in einem Gleis und die Wavelet transformierten als Wärmeinformationen vorgesehen sind, und ein Wavelet-Leistungsdichtespektrum (3) gebildet werden und zusätzlich ein Signalstärke-Diagramm (4) für verschiedene Wellenlängenbereiche (D0, D1, D2, D3) errechnet wird, wonach zur Ermittlung der Art, Lage, Ausdehnung und Größe der Gleisfehler aus dem Wärmebild die örtliche Lage (B, C, D, F), die Ausdehnung (Δx) und die zugeordneten Wellenlängenbereiche (E, D0, D1, D2, D3) vorherrschender Gleisfehler, insbesondere aus den Höhenschichtlinien des Wärmebildes, bestimmt werden.



(344850.0) HEL

Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren zur automatischen Auswertung von Gleismessdaten (1) der Gleisgeometrie und/ oder des Schotterbettes mit einer Recheneinrichtung beschrieben. Um eine automatische Generierung von Vorschlägen zur Behebung der Gleisfehler zu ermöglichen, wird vorgeschlagen, dass zunächst eine einem Gleisabschnitt zugeordnete Messreihe der auszuwertenden Gleismessdaten (1) mit einer Mehrzahl an Wavelets unterschiedlicher Wellenlängen Wavelet transformiert wird und aus diesen Wavelet transformierten eine Art Wärmebild, in dem die Wellenlänge über der Position in einem Gleis und die Wavelet transformierten als Wärmeinformationen vorgesehen sind, und ein Wavelet-Leistungsdichtespektrum (3) gebildet werden und zusätzlich ein Signalstärke-Diagramm (4) für verschiedene Wellenlängenbereiche (D0, D1, D2, D3) errechnet wird, wonach zur Ermittlung der Art, Lage, Ausdehnung und Größe der Gleisfehler aus dem Wärmebild die örtliche Lage (B, C, D, F), die Ausdehnung (Δx) und die zugeordneten Wellenlängenbereiche (E, D0, D1, D2, D3) vorherrschender Gleisfehler, insbesondere aus den Höhenschichtlinien des Wärmebildes, bestimmt werden.

(Fig. 3)

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur automatischen Auswertung von Gleismessdaten der Gleisgeometrie und/ oder des Schotterbettes mit einer Recheneinrichtung.

Die überwiegende Zahl der Eisenbahnstrecken ist als Schotteroberbau ausgeführt. Die Schwellen liegen im Schotter. Durch die wirkenden Radkräfte der darüberfahrenden Züge wird der Schotter abgerundet, teilweise gebrochen und abgenutzt. Dadurch entstehen unregelmäßige Setzungen im Schotter und Verschiebungen der seitlichen Lagegeometrie des Gleises. Durch die Setzungen des Schotterbettes treten Fehler in der Längshöhe, der Überhöhung (im Bogen), der Verwindung, der Spur und der Richtlage auf. Die Fehler ihrerseits erhöhen die wirkenden Kräfte die wiederum zerstörend auf den Schotter und den Untergrund einwirken.

Werden bestimmte von den Bahndirektionen festgelegte Grenzwerte oder Sicherheitsgrenzwerte dieser geometrischen Größen überschritten, dann werden Instandhaltungsarbeiten geplant und durchgeführt. Zur Behebung und Berichtigung dieser geometrischen Gleisfehler kommen Gleisbaumaschinen zum Einsatz. Vor den Gleisbauarbeiten werden die Gleise hinsichtlich der geometrischen Gleislage erfasst und daraus Korrekturwerte abgeleitet, die der Maschine zur Durchführung der Korrekturmaßnahmen übergeben werden.

Zur Abnahme der Korrekturarbeiten sind die Maschinen mit einem nachlaufenden Messsystem ausgestattet, welches die Gleislage hinsichtlich der Einhaltung vorgegebener Toleranzen überprüft (AT516278A1).

Stopfmaschinen mit vollhydraulischem Stopfantrieb (AT513973a1), erfassen während des Arbeitens mit Hilfe der in den vollhydraulischen Stopfantrieb integrierten Sensoren die Schottereigenschaften (AT515801A1). Durch Auswertung des Verlaufs der Kräfte, der Beistellgeschwindigkeit, des Beistellweges und des zeitlichen Ablaufs können Schotterbettparameter bei jeder gestopften Schwelle wie Schotterbetthärte, Verdichtkraft, Schotterbettsteifigkeit und Schotterdämpfung gemessen und angegeben werden (AT520117A1).

Der Grad der Verschmutzung des Schotters kann durch diese Parameter erfasst werden. Ab einem Verschmutzungsgrad von mehr als 30% Feinanteilen im Schotter kann die Gleislage durch Stopfen nicht mehr dauerhaft berichtigt werden. Der Schotter ist dann zu tauschen oder zu reinigen. Dazu dienen Schotterbettreinigungsmaschinen.

An markanten Steifigkeitsunterschieden im Gleis (wie eingefahrene Schienenstöße, Übergänge zu Brücken oder Tunneln) kommt es auf Grund der hohen Rad-Schiene-Kräfte zu einem Schlagen der Schwellen auf das Schotterbett und zu einer Zerstörung (und Abrundung) des Schotters. Oft sind solche Stellen äußerlich als weiße Stellen (austretender Gesteinsstaub) ersichtlich. An diesen Stellen führt die Fahrdynamik dazu, dass Schotter pulverisiert wird und diese Stellen durch austretenden Mineralstaub angezeigt werden. Diese Einzelfehler haben üblicherweise eine Ausdehnung von wenigen Metern, tendieren aber dazu sich weiter auszubreiten und in ihrer Fehleramplitude schnell anzuwachsen. Daraus resultieren häufig sicherheitskritische Fehler, die sofort oder besser präventiv behoben werden. Diese Fehler können durch Stopfmaschinen, die im Einzelfehlerbehebungsmodus arbeiten, behoben werden.

Durch unterschiedliche Setzungen des Schotterbettes kommt es zu Schwellenhohllagen. Diese treten typischerweise in einem Abstand von 2-5m auf (D0-Band). Sie können ebenfalls durch Gleisstopfmaschinen behoben werden.

Fehlerwellenlängen im Bereich (D1-Band) von 3 bis 25m kennzeichnen typischerweise Gleisfehler, die durch die Wechselwirkung mit den Fahrzeugen

(Achsabstände in den Drehgestellen, Drehgestellabstände oder Einzelachsabstände, Federungs- und Dämpfungsverhalten der Laufwerke) entstehen. Die Setzungen kommen durch Umlagerung, Abrieb und Bruch der Schotterkörner zustande. Gleislagefehler dieses Wellenlängenbereiches sind durch Gleisstopfmaschinen behebbar. Bekannt ist, dass ein hoch verschmutztes Schotterbett hohe Verdichtkräfte aufweist. Zwischen den Schotterbettkörnern bestehen keine Bewegungsspielräume, weil diese mit Feinmaterial gefüllt sind. Dies erhöht die Verdichtkräfte die aufgewendet werden müssen, um den Schotter zu bewegen und zu verdichten. Gleichzeitig weisen derartige verschmutzte Gleisbette eine reduzierte Haltbarkeit der berichtigten Gleisgeometrie auf, da die Reibungskräfte und die Verzahnung zwischen den Schotterbettkörnern gering sind.

Längerwellige Fehler (D2-Band) zwischen 25 und 70m sind Fehler des an den Schotter angrenzenden Planums. Typischerweise ist die Ursache eine mangelhafte Drainage oder mangelndes Tragverhalten (durchnässter Lehm oder Ton etc.), weshalb längerwellige Setzungen auftreten. Eine Behinderung der Drainage kann beispielsweise durch den Aufbau einer Lärmschutzwand entstehen, die den Abfluss des Wassers aus der Bettung behindert. Je längerwellig die Fehler sind desto eher ist ihre Ursache weiter unter der Schotterschicht zu finden. Diese Fehler können zwar durch Gleisstopfmaschinen ausgeglichen werden beheben aber die Fehlerursache nicht nachhaltig. Eine nachhaltige Behebung ist nur durch Gleisbettreinigung oder durch Planumssanierung möglich. Dazu wird mit Hilfe einer Planumsverbesserungsmaschine (oder andere nicht mechanisierte Methoden) eine Planumsschutzschicht eingebracht. Sind die Gleisfehler auf mangelhafte Drainage zurückzuführen, dann ist diese zu verbessern. Dies kann durch Ausbaggern der Bahngräben oder durch Reinigen und Spülen der Abflusskanäle erfolgen.

Fehler deren Wellenlänge größer als 70m sind (D3-Band), sind auf mangelhaftes nicht ausreichendes Tragverhalten des Untergrundes zurückzuführen. Hier hilft der Einsatz von Planumsverbesserungsmaschinen zum Einbau einer lastverteilenden Planumsschutzschicht oder der Bodenaustausch. Häufig zeigt sich erfahrungsgemäß diese Art des Fehlers durch langwellige Verwindungen.

Die Gleisstrecken werden durch die Bahn in Streckenklassen eingeteilt. Die Streckenklassen unterscheiden sich durch den Fahrgeschwindigkeitsbereich, in welchem sie betrieben werden. Jeder Streckenklasse werden eigene Grenzwerte für die Standardabweichungen der Gleisfehler zugeordnet. Diese Zuordnung wird für die Gleisgeometriegrößen Richtung, Höhe, Querneigung, Verwindung und Spur gemacht. Es gibt Grenzwerte, die zur Planung von Gleisarbeiten dienen (die innerhalb eines bestimmten Zeitraums durchgeführt werden sollen) und kritische, die eine unmittelbare Behebung oder Einschränkung des Betriebes (bis zur Sperrung) erfordern.

Die Messung der Schotterbetteigenschaften mittels vollhydraulischen Stopfantrieben hingegen erfasst sehr detailliert und konkret schwellengenau die Eigenschaften des Schotters (AT515801B1) und erlaubt so eine objektive Beurteilung.

Aktuell wird die Gleisinstandhaltung auf Basis von Gleisgeometriemessungen geplant. Gleismessfahrzeuge fahren in regelmäßigen Abständen über die Gleise und erfassen deren geometrische Lage. Die Gleislage wird dabei meist in Abschnitte von etwa 200m Länge unterteilt und die Standardabweichung der Höhenlage, der Richtung, der Überhöhung und Verwindung erfasst. Neben diesen statistischen Werten werden auch singuläre Einzelfehler gemessen. Überschreiten die statistischen Werte gewisse Komforttoleranzen dann wird eine Instandhaltungsarbeit geplant und durchgeführt.

Die Beurteilung der Gleisfehler wird dabei auf der Basis von Standardabweichungen oder gleitenden Mittelwerten über die Messsignale durchgeführt. Die Ermittlung der genauen Position, Ausdehnung, Art und Ursache der Gleisfehler bleibt unbestimmt bzw. unscharf. Die Planung und Durchführung der Gleisarbeiten beruht meist auf vorgegebenem Regelwerk oder der Erfahrung des Verantwortlichen. Schotterbett- und Untergrundeigenschaften finden in der Regel kaum Eingang in die Beurteilung, da meist keine objektiven Messdaten vorhanden sind.

Meist werden 200m lange Abschnitte ausgewertet, für die eine Gleisqualitätsziffer angegeben wird (TQI track quality index). Dieser berechnet sich meist aus einer gewichteten Zusammensetzung der Standardabweichungen der verschiedenen Gleisgeometrieparameter oder der Längshöhe allein.

Nachteilig bei diesen Methoden ist, dass sie nicht auf einer Analyse der Ursachen der Gleisfehler beruhen und daher oftmals die ungeeigneten Methoden zur Berichtigung anwenden. Dadurch kommt es zu erhöhten Kosten der Instandhaltung. Eine falsche Methode kann beispielsweise zu einer erhöhten und schnell steigenden Anzahl von Stopfarbeiten führen. Die richtige Methode wäre das Schotterbettreinigen gewesen. Dies führt nicht nur zu einer Erhöhung der Kosten der Instandhaltung, sondern wirkt sich auch nachteilig auf die Lebensdauer der Gleiskomponenten (Schotter, Schienen, Schwellen etc.) aus und erhöht die LCC. Der Schotter kann bei langer Liegedauer extrem geschädigt sein. Ein großer Anteil von Feinanteilen und organischem Material oder aus dem Untergrund nach oben gepresstem Boden kann die Zwischenräume der Schotterkörner ausgefüllt haben. Aus der Praxis ist bekannt, dass sich die Gleislage bei derartigen Schotterstrukturen nicht haltbar mit Gleisstopfmaschinen korrigieren lässt.

Aus der Praxis ist zudem bekannt, dass Einzelfehler zufällig im Gleis verteilt auftreten. Etwa 40% dieser lokalen Störstellen können dauerhaft behoben werden. 60% dieser Fehler entwickeln sich innerhalb kurzer Zeit wieder. Gleise die einen guten Schotterzustand aufweisen werden im Mittel circa alle vier Jahre gestopft. Einzelfehler die auf eine Zerstörung des Schotters hinweisen erfordern Instandhaltungsmaßnahmen ca. alle 1-3 Monate. Bei Jeder Stopfung wird über die Stopfwerkzeuge ein Teil des Schotters aufgrund der hohen Verdichtungskräfte geschädigt. Daher sind lange Durcharbeitszyklen von hoher wirtschaftlicher Bedeutung.

Stellen im Gleis mit hoher Bettungshärte (mit hoher Steifigkeit) bilden Hochpunkte im Gleis. Je unterschiedlicher die Steifigkeitsschwankungen im Gleisbett sind, umso größer ist die Kraftwechselwirkung zwischen Rad und Schiene, umso höher ist das

Gleis belastet und umso schneller verschlechtert sich die Gleisgeometrie. Singuläre kurze Störstellen im Gleis weisen die Tendenz auf sich unter den hohen wirkenden dynamischen Kräften im Gleis in Längsrichtung auszudehnen, an Höhe des Gleisfehlers zuzunehmen und Folgefehler durch die angeregten Gleisfahrzeuge zu produzieren.

Die Anwendung von Künstliche-Intelligenz-Methoden ist Stand der Technik. Die angewandten KI-Modelle können in verschiedene Kategorien eingeteilt werden. Man unterscheidet Künstliche Neuronale Netze (ANN Artificial Neural Networks), Adaptive Neuronale Fuzzy Interferenzsysteme (ANFIS), Entscheidungshilfesysteme (DSS Decision Support Systems) und Modelle Künstlichen Lernens. Künstliche Intelligenz-Modelle haben die Fähigkeit komplexes Gleislageverschlechterungsverhalten bzw. Art, Lage, Ausdehnung und Wellenlänge von Gleislagefehlern mit hoher Genauigkeit abzubilden.

KI-Modelle müssen mit Trainingsdatensätzen trainiert werden. Geprüft werden sie dann mit Testdatensätzen.

Mittels vergleichender LCC-Analyse verschiedener Instandhaltungsmethoden (Stopfen mit immer kürzeren Instandhaltungszyklen an Stelle eigentlich notwendiger Gleisreinigung) können deren Kosten miteinander verglichen werden. Um verschiedene Instandhaltungsstrategien miteinander zu vergleichen, werden beispielsweise so genannte Standardelemente oder Normkilometer ermittelt. Dazu wird z. B. das Expertenwissen der Eisenbahningenieure oder reale ermittelte Zahlen und Kosten eingebracht. Die Standardkilometer werden nach Kategorien wie Unterbauqualität, Radian, Verkehrsbelastung, Oberbaumform und Gleisanzahl unterteilt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur automatischen Auswertung und Analyse einer gemessenen Messreihe von Gleismessdaten, insbesondere einer Gleisgeometriegröße und/ oder des Schotterbettes, anzugeben. Die Analyse soll automatisch Art, Lage, Ausdehnung und Größe der Gleisfehler ermitteln. Das Verfahren soll außerdem automatisch Vorschläge zur Behebung der

Gleisfehler generieren und eine allgemeine Beurteilung des Gleiszustandes abgeben können.

Die Erfindung löst die gestellte Aufgabe mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruches 1. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen dargestellt.

Die Erfindung zeichnet sich dadurch aus, dass zunächst eine einem Gleisabschnitt zugeordnete Messreihe der auszuwertenden Gleismessdaten mit einer Mehrzahl an Wavelets unterschiedlicher Wellenlängen Wavelet transformiert wird und aus diesen Wavelet transformierten eine Art Wärmebild, in dem die Wellenlänge über der Position in einem Gleis und die Wavelet transformierten als Wärmeinformationen vorgesehen sind, und ein Wavelet-Leistungsdichtespektrum gebildet werden und zusätzlich ein Signalstärke-Diagramm für verschiedene Wellenlängenbereiche errechnet wird, wonach zur Ermittlung der Art, Lage, Ausdehnung und Größe der Gleisfehler aus dem Wärmebild die örtliche Lage, die Ausdehnung und die zugeordneten Wellenlängenbereiche vorherrschender Gleisfehler, insbesondere aus den Höhenschichtlinien des Wärmebildes, bestimmt werden.

Dazu wird also eine gemessene Messreihe von Gleismessdaten (beispielsweise Längshöhe, Richtung, Verwindung, Querhöhe, Bettungshärte, Verdichtkraft, Schottersteifigkeit, Schotterdämpfung) mittels der Waveletmethode und gegebenenfalls der der Fraktalmethode hinsichtlich der örtlichen Lage und Ausdehnung und ihrem Wellenlängengehalt analysiert. Wesentlich ist, dass mit den Wavelet-Transformationen im Gegensatz zu Fourier-Transformationen die Positionsinformationen der Fehler erhalten bleiben, einzelnen Fehler also in weiterer Folge eindeutige Positionen im Gleis zugeordnet werden können. Zudem wird ein Wavelet-Leistungsdichtespektrum errechnet und wird eine Art Wärmebild erzeugt in welchem färbig oder durch (Höhen-)Linien gleicher Intensität die Lage, Ausdehnung und Größe der Gleisfehler ersichtlich wird.

Zudem kann ein doppelt-logarithmisches Fraktal Diagramm erzeugt werden, aus welchem sich die Gleisfehler wellenlängenabhängig (aus der Steigung und Lage im

Wellenlängenbereich) errechnen lassen. Entsprechend dem analysierten Bereich der Wellenlängen, die in den Messreihen enthalten sind, wird automatisch Art, Lage und Ausdehnung des Gleisfehlers errechnet. Aus dem Integral über das entsprechende Wellenlängengebiet des Wavelet-Leistungsdichtespektrum wird die Intensität und Größe der Gleisfehler geschlossen. All dies dient zur automatischen Auswertung der gemessenen Messreihe einer Gleisgeometriegröße und der automatischen Ermittlung der Art, Lage, Ausdehnung und Größe der Gleisfehler. Aus der Analyse folgt die automatische Generierung von Vorschlägen zur Behebung der Gleisfehler. Aus der Analyse erfolgt auch die allgemeine Zustandsbeurteilung des betrachteten Gleises.

Erfindungsgemäß entsteht ein Expertensystem welches mit Hilfe objektiver Zahlen eine Zuordnung der Art, Lage und Ausdehnung der Gleisfehler automatisch erlaubt. Für diese Auswertung stehen aber neben Gleislagemessungen auch Informationen über den Schotter zur Verfügung. Eine mögliche wechselseitige Beeinflussung der verschiedenen Messgrößen wird durch dieses Expertensystem wahrscheinlich nicht erfasst.

Deshalb soll mit diesem Expertensystem eine Künstliche Intelligenz trainiert werden, die diese verborgenen Beziehungen in die Auswertung integriert, mitberücksichtigt und so zu höherer Präzision führt.

Wavelets wurden aus der Idee heraus geboren, eine Strecke in kürzere Abschnitte zu unterteilen und mit Hilfe der Fourier Transformation jene Stellen zu finden, an denen kurzweilige Gleisfehler auftreten (Kurzweg-Fourier-Transformation).

Im Gegensatz zu den Sinus- und Cosinus-Funktionen der Fourier Transformation besitzen Wavelets Lokalität im Wellenlängenspektrum und im Ortsspektrum. Vereinfacht gesagt wirkt die Wavelet Transformation so als würde das Signal stückweise mit einem Bandpass bestimmter Bandbreite gesiebt. So finden sich örtlich begrenzt bestimmte Fehlerwellenlängenbereiche. Aus einem einfachen Gleisfehlersignal folgt eine zweidimensionale Darstellung der Wellenlängen über

den Ort. Es gibt verschiedene Waveletfunktionen die angewendet werden. Typisch ist das Morlet-Wavelet und der Mexikanische Hut.

Das Wavelet des mexikanischen Hutes wird beispielsweise mathematisch wie folgt beschrieben:

$$\psi(x) = \frac{2}{\sqrt{3} \cdot \sqrt[4]{\pi}} \cdot (1 - x^2) \cdot e^{-\frac{x^2}{2}}$$

Die Wavelet Transformierte errechnet sich zu:

$$\mathcal{W}(F(x))(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} F(x) \cdot \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx$$

und wird Wavelet Transformierte von $F(x)$ bezüglich ψ genannt.

Mit b als Verschiebungsfaktor wird das Wavelet durch die Funktion $F(x)$ (z.B. den Verlauf der gemessenen Bettungshärte in Längsrichtung des Gleises) geschoben, mit a (Skalenfaktor) als Wellenlängenparameter wird die Wellenlänge des Wavelets variiert. Dadurch ergibt sich eine zweidimensionale Darstellung (über b der Position im Gleis ist sind die detektierten Wellenlängen aufgetragen).

Mit Hilfe der Anwendung der Fraktaltheorie kann aus Gleismessdatenverläufen des Gleises die so genannte Fraktalziffer berechnet werden. Dazu wird für eine bestimmte Abschnittslänge einer Eisenbahnstrecke, beispielsweise 200m, die Länge eines Polygonzuges, der in den Messdatenverlauf eingepasst wird, mit immer kleiner werdender Schrittweite berechnet. Für die Länge dieses Polygonzuges gilt:

$$L(d) = n \cdot d^{1-D_r}$$

$L(d)$ = Länge des Polygons; d = Polygonschrittweite und D_r = fraktale Dimension.

Logarithmiert man die Gleichung, dann gilt:

$$\log L(d) = (1 - D_r) \cdot \log(d) + \log(n)$$

In doppelt logarithmischer Darstellung werden (abschnittsweise) Regressionsgeraden hineingerechnet. Die Steigungen sind immer negativ (je feiner die Unterteilung umso größer die Polygonzuglänge) und ergeben sich zu

$$k=1-D_r$$

k ... Fraktalzahl

Untersuchungen zeigen, dass die unterschiedlichen Steigungen der Regressionsgeraden Wellenlängenbereichen und deren Ursachen zugeordnet werden können.

Nach den europäischen Normen werden die typischen Wellenlängenbereiche in 4 Kategorien eingeteilt. Diesen können nach Praxiserfahrungen und Messungen verursachende Ursachen des Gleises zugeordnet werden.

Bezeichnung	Wellenlängenbereich (m)	Beschreibung	Zugeschriebene Ursache
D0	$0,5 < \lambda \leq 3$ (5)	Kurzwellig	Schwelleninteraktion mit dem Schotter
D1	$3 < \lambda \leq 25$	Mittelwellig	Schotterverschmutzung
D2	$25 < \lambda \leq 70$	Langwellig	Mischzone und Untergrundprobleme
D3	$70 < \lambda \leq 150$	Großwellig	Untergrundprobleme

Tabelle 1: Wellenlängenbereiche und Zuordnung der Gleiseigenschaften

Die Tabelle zeigt die Einteilung der Wellenlängenbereiche und die Zuordnung, wodurch die Welligkeit verursacht wird.

Der Wellenlängenbereich D0 wird heute durch elektronische Inspektionsmessfahrten meistens nicht erfasst und ausgewertet. Er wird vor allem durch Schwellenhohllagen und Reaktionen zwischen Schwelle und Schienenbefestigung verursacht. Auf den Schotter aufschlagende Schwellen bilden sich bei 1,2m und zwischen 3 und 3,6m bevorzugt (also dem 2- und 5-6-fachen der üblichen Schwellenteilung von 0,6m).

Der Bereich D1 ist der typische Bereich, in welchem sich durch die Wagenkastenbewegungen und Drehgestellbewegungen quasiperiodische Gleisfehler ausprägen. Die dynamischen Lasten, die auf die Schiene einwirken führen zu einer Schotterdegradation. Die Folge: Schotterabrieb und Schotterkornbruch. Als Instandhaltungsmaßnahme wird gestopft oder der Schotter gereinigt und der Abraum durch Neuschotter ersetzt.

D2 entsteht in der Mischzone Schotter – Untergrund und im Untergrund. Auch dieser Bereich kann durch Stopfen und Gleisreinigung verbessert werden.

Der Bereich D3 ist auf Untergrundprobleme zurückzuführen, oftmals sind die langwelligen Schwankungen von Verwindungsschwankungen gekennzeichnet. Der Bereich D3 ist durch nicht ausreichende Tragfähigkeit gekennzeichnet. Mögliche Ursachen sind mangelhafte Drainage, schlechter anstehender Boden (Lehm, Ton, Torf), ungeeignetes Planumsmaterial oder fehlende bzw. zu schwache Planumsschutzschicht. Dieser Gleisfehler kann durch Behebung von Drainageproblem, Planumsverbesserung und -Sanierung oder Bodenaustausch behoben werden.

Erfindungsgemäß wird auf die aufgezeichneten Messreihen die Wavelet- und Fraktalanalyse angewendet. Das so erstellte Expertensystem wird zum Training einer Künstlichen Intelligenz verwendet.

Das KI-Modell liefert dann automatisch Lage, Ausdehnung und Art des Gleisfehlers. Außerdem liefert sie eine Angabe über den allgemeinen Qualitätszustand des

Gleises und schlägt basierend auf technischen und wirtschaftlichen Berechnungen die optimale Instandhaltungsmethode vor.

In der Zeichnung ist die Erfindung schematisch an einem Ausführungsbeispiel dargestellt. Es zeigen:

Fig. 1 Darstellung des Wavelets mexikanischer Hut,

Fig. 2 einen Fraktalplot des Gleisfehlerspektrums vor und nach einer Gleisbettreinigung

Fig. 3 eine Auswertung einer Gleisfehlermessreihe mittels Waveletanalyse

Fig. 1 zeigt beispielhaft die Form eines Wavelets – des so genannten mexikanischen Huts. Zur Auswertung wird das Wavelet durch die Messreihe geschoben. Gleiche Wellenlängenanteile des Signales matchen und erzeugen ein korrespondierendes Signal. Da diese Auswertung mit Durchläufen verschiedener Wellenlängen hintereinander geschieht ergibt sich ein zweidimensionaler Plot.

Fig. 2 zeigt das Ergebnis der Fraktalanalyse eines Gleisabschnittes vor und nach einer Gleisreinigung. Deutlich ist der Einfluss im mittelwelligen Bereich zu sehen 5, 6 (2-15m), während er im langwelligen Bereich praktisch durch die Schotterbettreinigung unbeeinflusst bleibt. Die flache Steigung im langwelligen Bereich 7 deutet darauf hin, dass der Untergrund ausreichende Tragfähigkeit aufweist und in Ordnung ist. Durch die Gleisreinigung ist eine Verbesserung eingetreten. Sie hatte allerdings keinen Einfluss auf den langwelligen Bereich. Verfolgt man die Änderung der Fraktalzahl über die Belastung des Gleises oder die Betriebsdauer, dann kann auf die verbleibende Lebensdauer des Schotters, bzw. die Verschlechterungsrate geschlossen werden. Genauso weisen größere Steigungen im langwelligen Bereich auf Untergrundprobleme hin. Kennzeichnend ist, dass die Fraktalanalyse für beliebige Gleislängen durchgeführt werden kann, beispielsweise auch auf gesamte Strecken oder ein gesamtes Gleisnetz. Sie liefert numerische Größen die unabhängig von der Länge des analysierten Musters sind.

Verschmutzter Schotter bleibt auch nach einer Stopfung verschmutzt, ebenso wenig verändern sich die Untergrundverhältnisse. Einzelne Geraden 5, 6, 7 geben Fehler im entsprechenden Wellenlängenbereich an. Je steiler die Geraden 5, 6 umso größer der Einfluss der Fehler. Die Fraktalanalyse wird als zweite unabhängige Methode zur Ermittlung der Fehlerwellenlängenbänder benutzt. Sie liefert zwar Art und Intensität der Fehler, gibt allerdings keinen Hinweis auf die Örtlichkeit. Sie kann diese Angaben nur für den ausgewerteten Abschnitt ermitteln und aussagen, dass in diesem Abschnitt priorisiert Gleisfehler mit diesem Fehlerwellenlängenanteil vorliegen.

Fig. 3 zeigt die Auswertung eines Messsignals mittels Wavelet-Analyse. Das Messsignal 1 (oberer Bildbereich) kann eine geometrische Messgröße sein (Längshöhe, Richtung, Verwindung, Spur, Querhöhe) aber auch eine physikalische (Schienentemperatur, Schotterbetthärte, Schotterbettsteifigkeit, Schotterdämpfung oder Verdichtkraft beim Stopfende) sein. Im Bild ist die Angabe des TQI (track quality index) zu sehen, der beispielsweise aus gewichteten Standardabweichungen der gleisgeometrischen und physikalischen Messgrößen errechnet wurde. Je größer der TQI umso schlechter das Gleis. Die Werte des TQI sind außerdem noch Gleisklassenspezifisch anzugeben. Ein Hochgeschwindigkeitsgleis welches mit 300km/h befahren wird hat enger tolerierte Werte als ein Güterwagengleis mit max. 80 km/h.

Unter dem Signalverlauf ist das mittels Wavelets (Morlet) errechnete zweidimensionale Wärmebild 2 angegeben. Wird dieses farbig dargestellt dann werden Fehlerintensitäten optisch deutlich hinsichtlich ihres Ortes und ihrer Ausdehnung ersichtlich. In vertikaler Richtung ist die Wellenlänge aufgetragen in horizontaler die Position im Gleis. Ausgewertet werden als Beispiel jeweils 400m Abschnitte, damit Fehlerwellenlängen bis 200m noch analysierbar sind. Die Auswertung im gezeigten Bild berücksichtigt Fehlerwellenlängen bis zu 150m und überdeckt damit alle vier interessierenden Wellenlängenbänder von D0 bis D3. Die Intensität der Fehler zeigen sich im Wärmebild als Höhenschichtlinien oder in Form von Farbgraduierung. So zeigt sich der Fehler J im Bereich G des Signales 1

entsprechend in dem Wärmebild 2 im Bereich des D1-Bandes bei etwa 20m Wellenlänge. Das ist typisch ein durch den Schotterzustand verursachter Fehler, der durch Stopfung behoben werden kann. Der Fehler kann im Bereich von 250 bis 350m verortet werden. Da auch um 220m ein Fehler auftritt ist eine Stopfung von 200 bis 350m die beste Wahl. Im D2- und D3-Band sind Anteile zu sehen die auf ein Drainageproblem und ein Tragfähigkeitsproblem in diesem Bereich hinweisen. Dies ist als eigentliche Ursache der in diesem Bereich auftretenden Gleisfehler zu sehen. Im unteren Diagramm werden die Fehlerintensitäten für die drei Wellenlängenbänder D0 bis D2 angezeigt. Diese erleichtern die Zuordnung der Lage und Ausdehnung sowie der Fehlerintensität. Rechts neben dem Wärmebild ist das Wavelet-Leistungsdichtespektrum LD zu sehen. Vertikal ist die Wellenlänge aufgetragen und horizontal die Leistungsdichte. In das Diagramm sind die Wellenlängengebänder eingezeichnet. Zur Bestimmung der durchschnittlichen Leistungsdichte in einem Wellenlängenband wird das Integral (eingezeichnet A) berechnet. Dies wird für alle vier Bänder durchgeführt. Wichtig ist auch die Detektion der Maximalwerte, weil sie die dominierenden Gleisfehlerwellenlängen angeben. Mit Hilfe der Methode lassen sich auch Einzelfehler (im Bild beispielsweise mit der Ausdehnung Δx) detektieren und in ihrer Lage und Ausdehnung angeben.

Entsprechend der oben gezeigten Tabelle 1 lassen sich die Art der Fehler zuordnen und basierend darauf die optimale Instandhaltung. Mit Hilfe der vergleichenden LCC-Analyse kann begründet werden, warum beispielsweise die Stopfung (wie im vorliegenden Fall) günstiger ist als die Gleisreinigung über diesen kurzen Bereich.

Die Markierung B zeigt beispielsweise einen kurzwelligen Gleisfehler im Bereich 40m der auf Schwellenhohllagen zurückzuführen ist. Gleichzeitig zeigt ein Bild in das PSD-Spektrum, dass die Intensität niedrig ist und daher eine Stopfung in diesem Bereich noch nicht durchgeführt werden muss. Markierung F identifiziert eine Schwäche in der Grenzschiene bei einer Wellenlänge um etwa 35m. Hier wäre anzuraten diesen Abschnitt auf wirksame Drainage zu untersuchen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur automatischen Auswertung von Gleismessdaten (1) der Gleisgeometrie und/ oder des Schotterbettes mit einer Recheneinrichtung gekennzeichnet dadurch, dass zunächst eine einem Gleisabschnitt zugeordnete Messreihe der auszuwertenden Gleismessdaten (1) mit einer Mehrzahl an Wavelets unterschiedlicher Wellenlängen Wavelet transformiert wird und aus diesen Wavelet transformierten eine Art Wärmebild, in dem die Wellenlänge über der Position in einem Gleis und die Wavelet transformierten als Wärmeinformationen vorgesehen sind, und ein Wavelet-Leistungsdichtespektrum (3) gebildet werden und zusätzlich ein Signalstärke-Diagramm (4) für verschiedene Wellenlängenbereiche (D0, D1, D2, D3) errechnet wird, wonach zur Ermittlung der Art, Lage, Ausdehnung und Größe der Gleisfehler aus dem Wärmebild die örtliche Lage (B, C, D, F), die Ausdehnung und die zugeordneten Wellenlängenbereiche (E, D0, D1, D2, D3) vorherrschender Gleisfehler, insbesondere aus den Höhenschichtlinien des Wärmebildes, bestimmt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur Bestimmung der Intensität der Gleisfehler Integrale (A) der Leistungsdichten über der Wellenlänge, insbesondere über Wellenlängenbereiche (D0 – D3), im Waveletleistungsdichtespektrum (3) gebildet werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass ermittelte Gleisfehler Wellenlängenbereichen (D0 – D3) zugeordnet werden.
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass entsprechend der örtlichen Ausdehnung und Lage der Wärmeinformationen im

Wärmebild (2, C, D, E) auch die Intensität (Signalstärke, A) der Gleisfehler bestimmt werden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Lage und Größe von Einzelfehlern (D , Δx) aus dem Wärmebild bestimmt wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Messreihe der Gleismessdaten (1) mittels der Methode der Fraktalanalyse hinsichtlich ihres Wellenlängengehalts analysiert wird (Fig. 2), wobei Gleisfehler entsprechend dem analysierten Bereich der Wellenlängen automatisch hinsichtlich der Wellenlängenbereiche (D_0 , D_1 , D_2 , D_3) klassifiziert werden, wobei Entsprechend der Steigung der Fraktalgeraden (5, 6, 7) die Größe und Intensität der Gleisfehler bestimmt und der Zustand des Gleises (TQI) berechnet wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass mit dem derart gebildeten Expertensystem eine künstliche Intelligenz trainiert wird, die automatisch aus den zur Verfügung gestellten Daten (1, 2, 3, 4, TQI) lernt Gleisfehler zu bestimmen.

8. Verfahren nach Anspruch 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass als Ergebnis der Auswertung Vorschläge zur Behebung der Gleisfehler generiert werden.

9. Verfahren nach Anspruch 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Ergebnisse der Auswertung und Vorschläge zu ihrer Behebung der Gleisfehler automatisch in einem Report zusammengefasst werden (Fig. 3).

10. Verfahren nach Anspruch 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass aus den Ergebnissen der Auswertung die voraussichtliche Haltbarkeit von Stopfarbeiten berechnet und abgeschätzt wird.

FIG.1

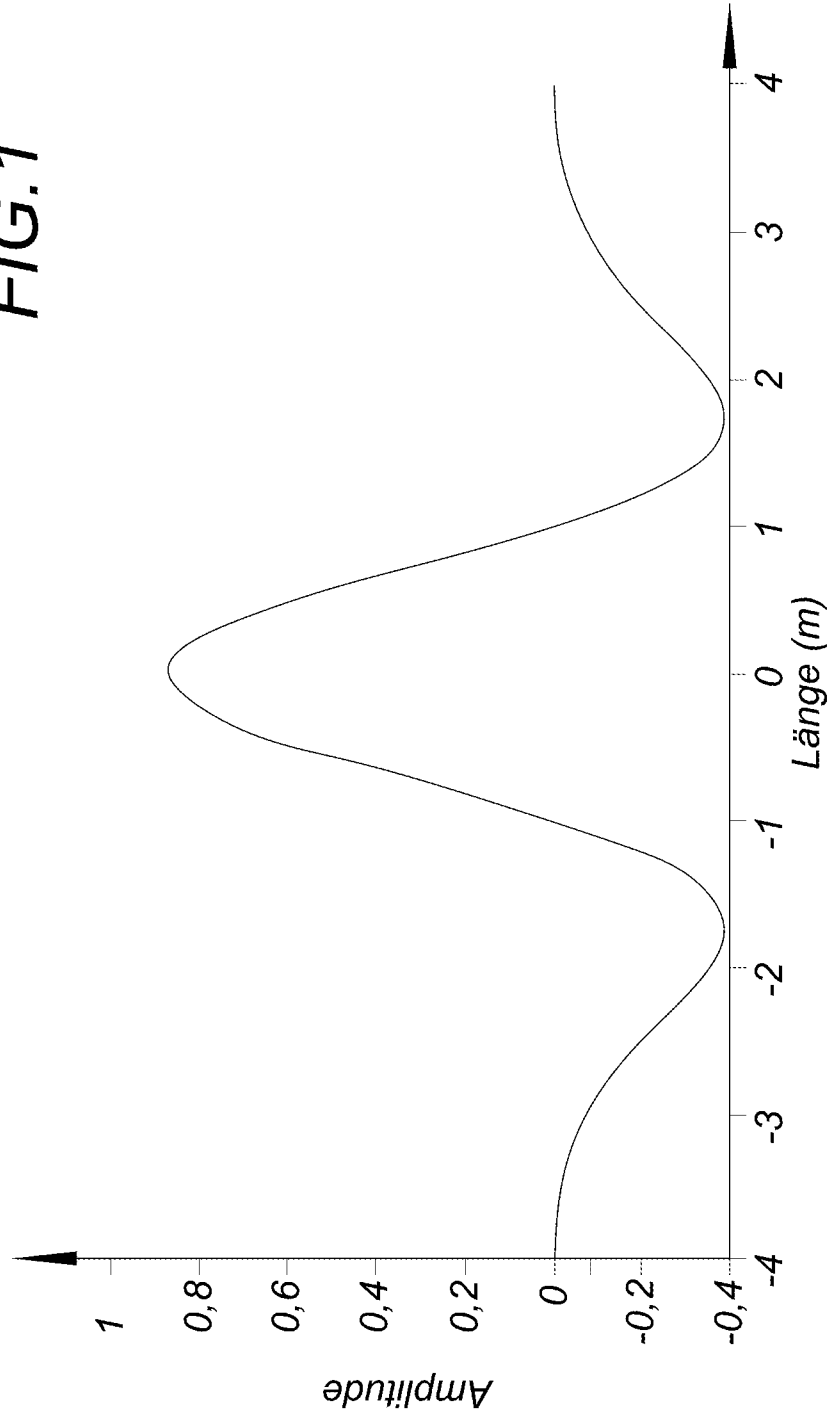
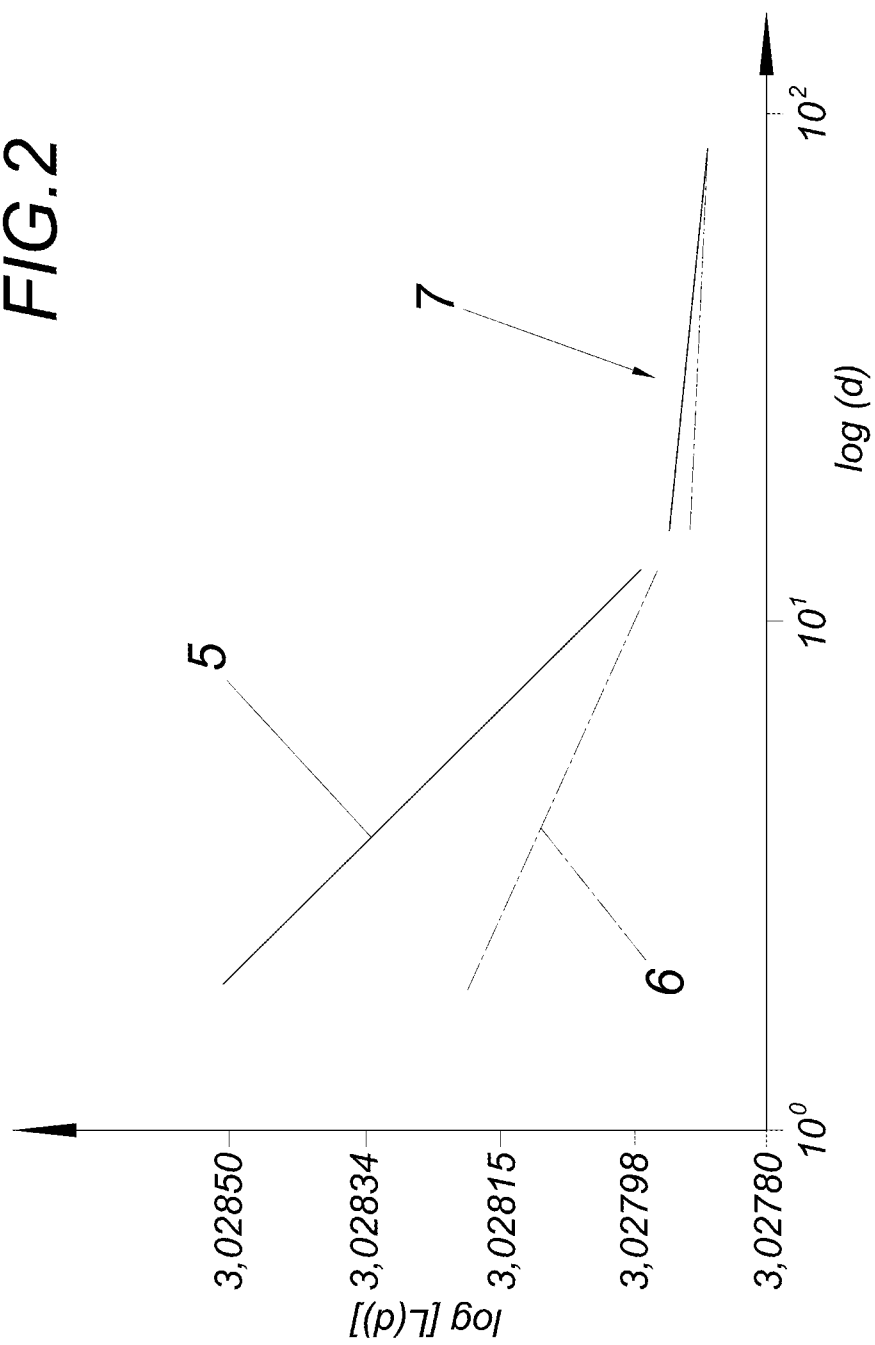
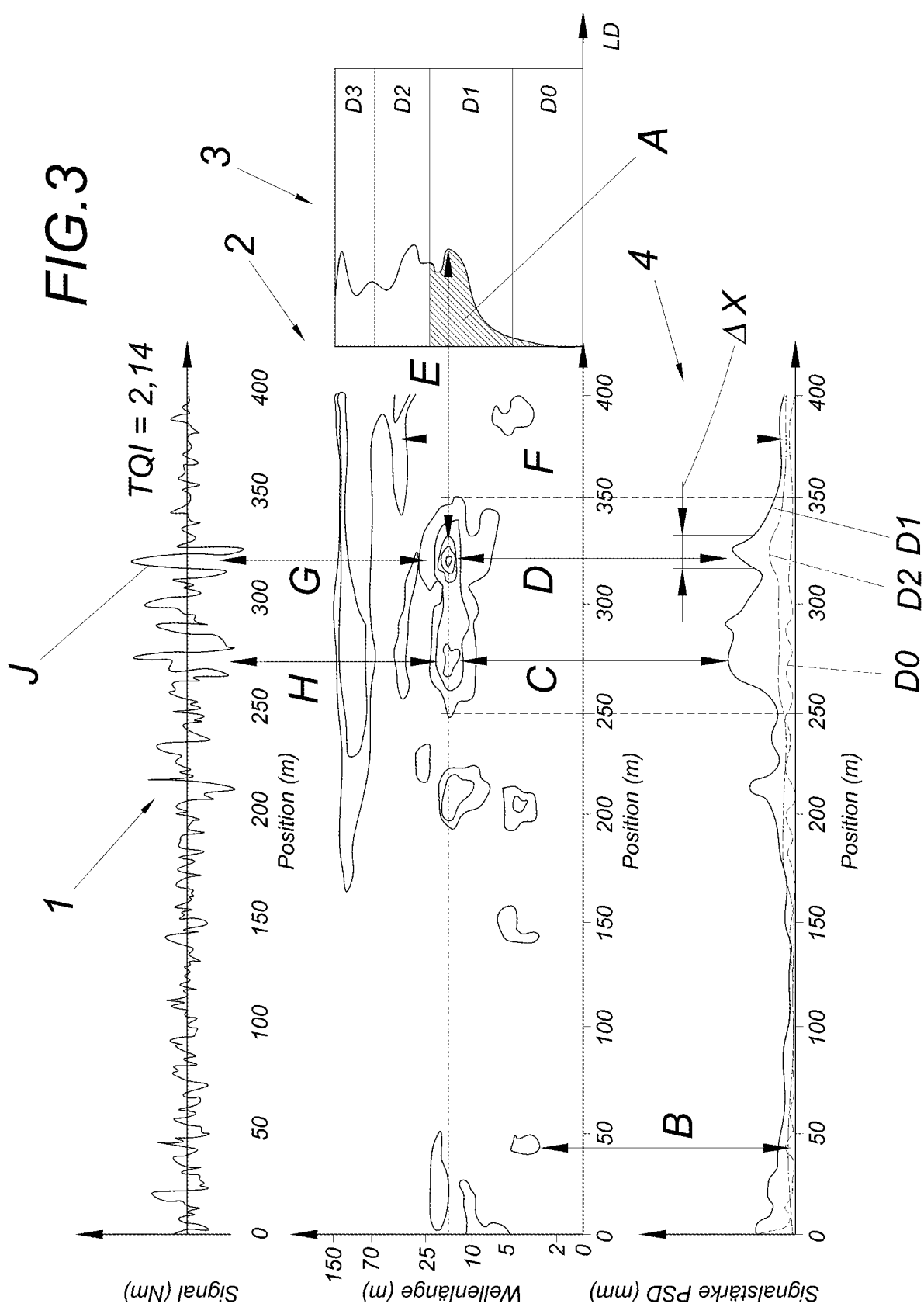


FIG.2





Patentansprüche

1. Verfahren zur automatischen Auswertung von Wavelet transformierten Gleismessdaten (1) der Gleisgeometrie und/ oder des Schotterbettes mit einer Recheneinrichtung gekennzeichnet dadurch, dass zunächst eine einem Gleisabschnitt zugeordnete Messreihe der auszuwertenden Gleismessdaten (1) mit einer Mehrzahl an Wavelets unterschiedlicher Wellenlängen Wavelet transformiert wird und aus diesen Wavelet transformierten eine Art Wärmebild, in dem die Wellenlänge über der Position in einem Gleis und die Wavelet transformierten als Wärmeinformationen vorgesehen sind, und ein Wavelet-Leistungsdichtespektrum (3) gebildet werden und zusätzlich ein Signalstärke-Diagramm (4) für verschiedene Wellenlängenbereiche (D0, D1, D2, D3) errechnet wird, wonach zur Ermittlung der Art, Lage, Ausdehnung und Größe der Gleisfehler aus dem Wärmebild die örtliche Lage (B, C, D, F), die Ausdehnung und die zugeordneten Wellenlängenbereiche (E, D0, D1, D2, D3) vorherrschender Gleisfehler, insbesondere aus den Höhenschichtlinien des Wärmebildes, bestimmt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur Bestimmung der Intensität der Gleisfehler Integrale (A) der Leistungsdichten über der Wellenlänge, insbesondere über Wellenlängenbereiche (D0 – D3), im Waveletleistungsdichtespektrum (3) gebildet werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass ermittelte Gleisfehler Wellenlängenbereichen (D0 – D3) zugeordnet werden.
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass entsprechend der örtlichen Ausdehnung und Lage der Wärmeinformationen im

Wärmebild (2, C, D, E) auch die Intensität (Signalstärke, A) der Gleisfehler bestimmt werden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Lage und Größe von Einzelfehlern (D , Δx) aus dem Wärmebild bestimmt wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Messreihe der Gleismessdaten (1) mittels der Methode der Fraktalanalyse hinsichtlich ihres Wellenlängengehalts analysiert wird (Fig. 2), wobei Gleisfehler entsprechend dem analysierten Bereich der Wellenlängen automatisch hinsichtlich der Wellenlängenbereiche (D_0 , D_1 , D_2 , D_3) klassifiziert werden, wobei Entsprechend der Steigung der Fraktalgeraden (5, 6, 7) die Größe und Intensität der Gleisfehler bestimmt und der Zustand des Gleises (TQI) berechnet wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass mit dem derart gebildeten Expertensystem eine künstliche Intelligenz trainiert wird, die automatisch aus den zur Verfügung gestellten Daten (1, 2, 3, 4, TQI) lernt Gleisfehler zu bestimmen.

8. Verfahren nach Anspruch 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass als Ergebnis der Auswertung Vorschläge zur Behebung der Gleisfehler generiert werden.

9. Verfahren nach Anspruch 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Ergebnisse der Auswertung und Vorschläge zu ihrer Behebung der Gleisfehler automatisch in einem Report zusammengefasst werden (Fig. 3).

10. Verfahren nach Anspruch 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass aus den Ergebnissen der Auswertung die voraussichtliche Haltbarkeit von Stopfarbeiten berechnet und abgeschätzt wird.