



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
10.08.2016 Patentblatt 2016/32

(51) Int Cl.:
B61K 9/08 (2006.01) B61L 23/04 (2006.01)
B61L 27/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **15188610.8**

(22) Anmeldetag: **06.10.2015**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
MA

(30) Priorität: **18.12.2014 DE 102014119095**

(71) Anmelder: **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**
51147 Köln (DE)

(72) Erfinder: **Linder, Christian**
38542 Leiferde (DE)

(74) Vertreter: **Albrecht, Ralf**
Paul & Albrecht
Patentanwaltssozietät
Hellersbergstrasse 18
41460 Neuss (DE)

(54) **VERFAHREN UND EINRICHTUNG ZUR OPTIMIERUNG DER GLEISOBERBAUINSTANDHALTUNG DURCH EINZELFEHLERKLASSIFIKATION**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Optimierung der Gleisoberbauinstandhaltung mit den Schritten Identifizieren (501) von im Gleis vorkommenden und bei Gleisvermessungen hervortretenden Einzelfehlertypen, Ermitteln (501) von Referenzmessungen für jeden dieser Einzelfehlertypen, Anlegen (501) von Datensätzen bestehend aus jeweils einer Referenzmessung in Form eines Messdatenvektors sowie deren zugeordneter Einzelfehlertyp in einer Datenbank (502) für bekannte Einzelfehlertypen, Trainieren eines Klassifikators (505) mit den angelegten Datensätzen, Klassifizieren von neuen Messdaten (503, 504) eines Einzelfehlers anhand der angelegten Datensätze durch den Klassifikator (505) und Entscheiden (506) über Instandhaltungsmaßnahmen bezogen auf den Einzelfehler zumindest teilweise basierend auf der Klassifizierung der Messdaten (503, 504) des Einzelfehlers. Die Erfindung bezieht sich ferner auf eine entsprechende Datenbank (502) zur Optimierung der Gleisoberbauinstandhaltung.

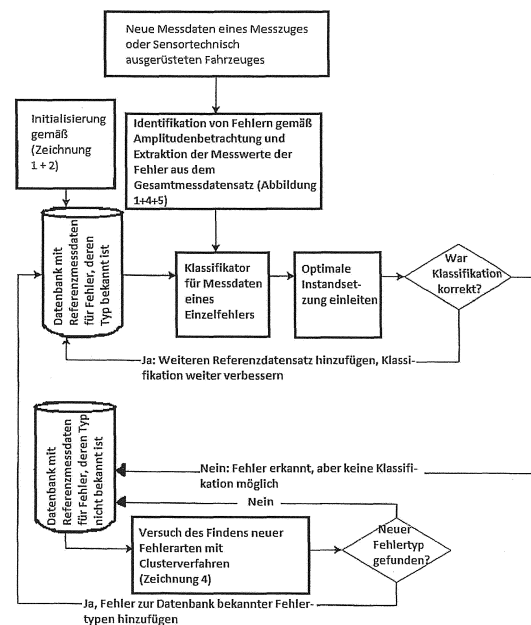


Fig. 5

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Optimierung der Gleisoberbauinstandhaltung, insbesondere in Bezug auf Einzelfehler, die in den Gleisen auftreten. Ferner bezieht sich die Erfindung auf eine in diesem Zusammenhang eingesetzte Datenbank.

[0002] Ist von einem Gleisoberbau die Rede, so ist hiermit das Gebilde aus den Schienen, den Schwellen, den Befestigungen zwischen diesen Beiden, der Bettung (oftmals Schotter, Beton oder Stahl) sowie dem darunter liegenden Untergrund eines Eisenbahninfrastrukturfahrwegs gemeint. Dieser Gleisoberbau muss wie alle anderen Teile der Eisenbahninfrastruktur instandgehalten werden, da er während des Betriebs zum einen der Betriebsbelastung und zum anderen Witterungseinflüssen ausgesetzt ist.

[0003] Um sich einen ersten Gesamtüberblick über den aktuellen Gleiszustand zu verschaffen, setzen Eisenbahninfrastrukturbetreiber heutzutage weniger auf visuelle Inspektionen der Gleisstrecke, sondern setzen anstatt dessen nahezu ausschließlich Messfahrzeuge ein, die vollautomatisch Messungen vornehmen. Solche Messfahrzeuge erfassen unmittelbar oder mittelbar die vertikale Abweichung des Gleises von seiner Soll-Lage in Abhängigkeit von den abgefahrenen Streckenkilometern der Gleisstrecke. Hierbei erfolgt die mittelbare Messung über den Umweg einer Betrachtung der Auswirkungen der Gleisabweichungen auf die Messfahrzeugreaktion. Genauer gesagt werden die vertikalen Radsatzlager-Beschleunigungen erfasst und durch eine doppelte Integration in die vertikale Gleisabweichung umgerechnet. Bei den Messergebnissen der vertikalen Gleisabweichungen tritt häufig das Fehlerbild einer deutlichen, punktuellen Verformung des Gleises in vertikaler Richtung auf. Für einen solchen vertikalen Einzelfehler liegen die Grenzwerte in Deutschland je nach zugelassener Streckenhöchstgeschwindigkeit in einem Bereich von 9 - 21 mm vertikaler Abweichung.

[0004] Im Folgenden werden zur besseren Veranschaulichung die drei wichtigsten Ursachen vertikaler Einzelfehler, nämlich Übergangszonen, schlechte oder schlecht verarbeitete Schienenbauteile sowie Schlammstellen und Hohllagen, erläutert.

[0005] Hinsichtlich der Übergangszonen ist zu erwähnen, dass sich die Schienen an Streckenabschnitten verformen, an denen sich die Steifigkeit der Bettung ändert. Dies ist beispielsweise bei Tunnelleinfahrten und Tunnelausfahrten der Fall, denn im Tunnel liegen die Schwellen und Schienen auf Beton, außerhalb allerdings auf Schotter. Der Schotter gibt wegen seiner etwas geringeren Steifigkeit unter der Lasteinwirkung des aufstehenden Zuges etwas nach unten nach, der Beton nicht. Dies bedeutet, dass sich das Gleis außerhalb des Tunnels durch natürliche Setzung des Schotters leicht nach unten absenkt, innerhalb des Tunnels wegen des Betonbodens jedoch nicht oder nur unmerklich. Es entsteht eine kleine Rampe bei der Tunnelleinfahrt und eine Senke bei der

Tunnelausfahrt. Streckenabschnitte, bei denen eine solche Änderung der Bettungssteifigkeit existiert (Tunnel → Schotter auf Beton, Bahnübergänge → Schotter auf Straßenasphalt, Brücken → Schotter auf Stahl, etc.) nennt man Übergangszonen. Diese vertikalen Einzelfehler sind relativ langwellige geometrische Abweichungen der Soll-Gleislage, denn sie haben eine Ausdehnung von ca. 2-5 Metern entlang der Gleisstrecke. Bezüglich schlechter oder schlecht verarbeiteter Schienenbauteile ist zu erwähnen, dass die Schienen in der Regel aus Schienenstücken mit einer jeweiligen Länge von etwa 100m zusammengebaut werden. Diese Schienenelemente müssen also alle 100m aneinandergeschweißt werden. Wenn durch schlechtes Schweißen die aneinanderstoßenden Schienenstücke nicht exakt plan aneinander liegen, entsteht eine Schweißkante, die bei Befahrung der Stelle das überrollende Rad entsprechend anschlägt. Je nach Befahrungsrichtung führt dieser Einzelfehler zu einem Schlag nach oben oder unten. Des Weiteren ist ein häufig als Einzelfehler erkanntes Phänomen das Herzstück einer Weiche. Konstruktionsbedingt hat die spurführende Schiene in der Weiche eine kleine Lücke (die Herzstücklücke). Je nach fahrdynamischer Eigenschaft des überfahrenden Fahrzeugs schlägt das Rad in dieser Lücke nach unten aus und trifft dann auf das massive Weichenherzstück. Bei idealer Verarbeitung der Weiche ist dieser Effekt minimal. Bei hohem Abnutzungsgrad erreicht ein solcher vertikaler Einzelfehler jedoch oft die vorgegebenen Grenzwerte. Diese vertikalen Einzelfehler sind im Gegensatz zu den vertikalen Einzelfehlern der Übergangszonen relativ kurzwellige geometrische Abweichungen der Soll-Gleislage, denn sie haben eine Ausdehnung von wenigen Zentimetern entlang der Gleisstrecke.

[0006] Zuletzt soll noch kurz auf vertikale Einzelfehler an Schlammstellen und Hohllagen eingegangen werden. Hierbei handelt es sich um eine Inhomogenität des Schotterbettes. Wenn der Schotter an einer Stelle besonders beansprucht wird, brechen die Schottersteine an den Kanten ab. Wiederholt sich dieser Vorgang oft genug, so können einzelne Schottersteine derart zerkleinert werden, dass ihre Korngröße klein genug wird, um vom Niederschlag ausgespült zu werden. Geschieht dies, entstehen kleine Kammern im Schotterbett, bei denen die Anzahl der Steine und damit ihre Dichtigkeit so verringert wird, dass ein aufstehendes Fahrzeug die Schiene durch sein Gewicht in diese Hohllage eindrückt. Dieser Typ eines vertikalen Einzelfehlers ist in den Messdaten als Senke zu erkennen.

[0007] Ab einer gewissen Amplitude eines vertikalen Einzelfehlers ist, nicht zuletzt aus Gründen der Fahrtsicherheit und des Fahrkomforts, eine Instandsetzung des entsprechenden Gleisstreckenabschnitts geboten. Bei der Beurteilung eines Einzelfehlers wurde und wird daher heute häufig noch immer lediglich die Amplitude der Einzelfehlermesswerte betrachtet, wie dies zum Beispiel in der Konzernrichtlinie 821 der Deutschen Bahn beschrieben ist. Hierbei geht man bei Überschreiten eines be-

stimmten Grenzwerts für die Amplitude automatisch von einem kritischen Einzelfehler aus, ohne jedoch den wahren Fehlertyp, also beispielsweise eine Herzstücküberfahrt oder einen Schienenstoß, zu kennen. Im Hinblick auf eine Verschlimmerung des Einzelfehlers in Bezug auf eine seiner Eigenschaften, der sogenannten Degradation, geht man heutzutage bei der Erstellung einer Prognose, ab wann der Einzelfehler einen kritischen Grenzwert überschreitet, von einem einfachen, linearen Regressionsmodell aus. Hiervon abweichende Prognosemodelle sind bei einer reinen Amplitudenbetrachtung derzeit nicht nahegelegt, da keine Informationen über den Einzelfehlertyp vorliegen.

[0008] Immer häufiger werden allerdings neben der Amplitude auch andere Einzelmerkmale einer Einzelfehlermesskurve bei der Beurteilung des Einzelfehlers berücksichtigt. Wie beispielsweise in der EP 1 977 950 B1 beschrieben ist, werden insbesondere Steigungen und Flächenintegrale der Messkurve der vertikalen Gleisabweichung betrachtet. Ferner ist aus der KR 102011134547 A und der Europäischen Norm EN13848 bekannt, einen Einzelfehler auch anhand seiner Wellenlänge, d.h. seiner Ausdehnung entlang der Gleisstrecke, zu beurteilen. Hierbei wird vor allem davon ausgegangen, dass eine Einzelfehleramplitude einer gewissen Größe bei einer kleineren Wellenlänge kritischer ist als bei einer größeren Wellenlänge. Bisher geschieht die Beurteilung der Kritikalität eines Einzelfehlers also auf Basis einiger weniger Merkmale einer häufig doch recht komplexen Einzelfehlermesskurve. Da die gesamte Form der Einzelfehlermesskurve kaum Berücksichtigung findet, findet auch eine mögliche Systematik des Kurvenverlaufs im Hinblick auf Kurven bereits bekannter Einzelfehlerquellen keine Berücksichtigung. Dies ist bedenklich, da die Form der Einzelfehlermesskurve und somit auch der Einzelfehlertyp die Auswirkungen des Einzelfehlers auf ein Schienenfahrzeug bei gleicher Amplitude erheblich beeinflussen.

[0009] Eine Kenntnis des genauen Typs des zu beurteilenden Einzelfehlers wäre also äußerst hilfreich, insbesondere, um optimale Entscheidungen über Instandhaltungsmaßnahmen bezogen auf den Einzelfehler treffen zu können. Denn bei solchen Entscheidungen kommt es oft auf Erfahrungswerte von früheren Einzelfehlern gleichen Typs an. So gibt es beispielsweise Erfahrungswerte darüber, wie sich eine bestimmte Einzelfehlerart mit der Zeit entwickelt. Eine systematische Zuordnung eines Einzelfehlers zu einem bestimmten Einzelfehlertypen anhand vorhandener Einzelfehleroriginalmessdaten ist auch weder in der DE 102011101226 A1, wo es lediglich um einen Versuch einer Beschreibung der Form eines Einzelfehlers mit Hilfe vorherbestimmter Funktionen geht, noch in der EP 1 271 364 A2 beschrieben. In der EP 1 271 364 A2 ist nämlich lediglich beschrieben, dass einem Einzelfehler eine Bezeichnung wie "guter Zustand" oder "schlechter Zustand" zugeordnet wird, ein direkter oder indirekter Bezug auf den vorhandenen Einzelfehlertyp wird nicht hergestellt.

[0010] Vor diesem Hintergrund liegt nun der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Optimierung der Gleisoberbauinstandhaltung bereitzustellen, bei dem für jeden neu gemessenen Einzelfehler der Einzelfehlertyp anhand bereits vorhandener Einzelfehleroriginalmessdaten bestimmt werden kann. Des Weiteren soll eine in diesem Zusammenhang eingesetzte Datenbank angegeben werden.

[0011] Die Aufgabe ist erfindungsgemäß durch ein Verfahren zur Optimierung der Gleisoberbauinstandhaltung gelöst, das die folgenden Schritte aufweist:

Identifizieren von im Gleis vorkommenden und bei Gleisvermessungen hervortretenden Einzelfehlertypen;

Ermitteln von Referenzmessungen für jeden dieser Einzelfehlertypen;

Anlegen von Datensätzen bestehend aus jeweils einer Referenzmessung in Form eines Messdatenvektors sowie deren zugeordneter Einzelfehlertyp in einer Datenbank für bekannte Einzelfehlertypen;

Trainieren eines Klassifikators mit den angelegten Datensätzen;

Klassifizieren von neuen Messdaten eines Einzelfehlers anhand der angelegten Datensätze durch den Klassifikator; und

Entscheiden über Instandhaltungsmaßnahmen bezogen auf den Einzelfehler zumindest teilweise basierend auf der Klassifizierung der Messdaten des Einzelfehlers.

[0012] Das erfindungsgemäße Verfahren beginnt mit der sogenannten Initialisierungsphase, die die Verfahrensschritte der Identifizierung von Einzelfehlertypen, der Ermittlung von Referenzmessungen zu den Einzelfehlertypen und des Anlegens der Datensätze umfasst. Im Anschluss an diese Initialisierungsphase folgt die Benutzungsphase, bei der zunächst der Klassifikator mit den in der Initialisierungsphase angelegten Datensätzen trainiert wird und danach, sobald neu gemessene Einzelfehlermesswerte zur Verfügung stehen, diese durch den Klassifikator klassifiziert werden. Zweckmäßigerweise werden möglichst viele im Gleis vorkommende Einzelfehlertypen wie Hohllagen, Schienenstöße, Herzstücke, Übergangszonen, Schlammstellen sowie bislang noch unbekannte beziehungsweise unbenannte Einzelfehlertypen identifiziert. Dies bietet den Vorteil, dass dann während der späteren Benutzungsphase mehr Daten zur Verfügung stehen. Mit Bezug auf die Ermittlung von Referenzmessungen ist zu erwähnen, dass diese vorteilhafterweise nach ihrer Ermittlung auf einem Speichermedium abgespeichert werden. Die im nächsten Verfahrensschritt angelegten Datensätze umfassen be-

vorzugt zwei Felder. Das erste Feld ist ein Array von Messdaten. In diesem Feld sind die einzelnen Datenpunkte der Einzelfehler als Vektoren unterschiedlicher Länge gespeichert. Das zweite Feld dient zur Speicherung des Einzelfehlertyps. Mit Hilfe der Messdatenvektoren in den Datensätzen können bereits vorhandene Originalmessdaten als solche direkt bei der Bestimmung der Einzelfehlerform eines Einzelfehlers berücksichtigt werden. Da die Datensätze die originalen Messwerte und nicht nur aus einer Kurvenanpassung resultierende Näherungsfunktionen beinhalten, ist ein maximaler Informationsgehalt der Datensätze gewährleistet. Besonders bevorzugt wird durch die Klassifizierung der Messdaten des Einzelfehlers anhand der angelegten Datensätze der genaue Einzelfehlertyp des Einzelfehlers unmittelbar bestimmt und dem Einzelfehler zugeordnet. Diese Zuordnung eines Einzelfehlertyps kann nach der Messung sehr zeitnah automatisch geschehen, ohne dass es nötig wäre einen Bautrupp zur Begutachtung des Einzelfehlers und zur Bestimmung des Einzelfehlertyps auf die Gleisstrecke zu entsenden.

[0013] Da einige Einzelfehler ohne Belastung des Gleises nur schwer erkennbar sind, wäre eine solche manuelle Begutachtung des Einzelfehlers zudem gegebenenfalls unvollständig und Vorgänge müssten wiederholt werden. Ferner könnte eine solche Begutachtung auch falsch sein, so dass Baumaschinen angefordert werden, die gar nicht zur Beseitigung des speziellen Einzelfehlertyps benötigt werden. Im schlimmsten Fall arbeiten die Maschinen dennoch und erzeugen neue Fehler, so dass neben dem alten, nicht beseitigten Problem nun ein Neues dazukäme. Diese Problematik besteht beim vorliegenden Verfahren nicht, da hier eine erste, bereits sehr verlässliche Zuordnung des Einzelfehlertyps automatisch erfolgt.

[0014] Dadurch, dass der Klassifikator mit den angelegten Datensätzen unter Anwendung von Methoden des Data Minings, wie beispielsweise der Methode des überwachten Lernens, trainiert wird, lässt sich der Einzelfehlertyp auch äußerst zuverlässig bestimmen. Hierbei wird bei den zuvor erwähnten Methoden insbesondere durch eine Analyse der bereitgestellten Messdaten und ein Erkennen bestimmter Trends oder Muster, die vom sonstigen strukturlosen Rauschen abweichen, ein Modell erstellt, auf dessen Grundlage eine Klassifizierung später neu gemessener Einzelfehler erfolgen kann. Bei dem Klassifikator kann es sich beispielsweise um einen Algorithmus, ein Programmobjekt oder eine Funktion handeln. Das nun eine Entscheidung über Instandhaltungsmaßnahmen bezogen auf den Einzelfehler basierend auf einer zuverlässigen Klassifizierung der Messdaten des Einzelfehlers und somit auf einem zuverlässig bestimmten Einzelfehlertyp getroffen werden kann ist äußerst wichtig, da man für verschiedene Fehlertypen auch verschiedene Instandhaltungsmaßnahmen einsetzen muss. Ebenso hängt die Erstellung einer Prognose über die weitere zeitliche Entwicklung des Einzelfehlers stark von dessen Einzelfehlertyp ab.

[0015] Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass das Verfahren die folgenden weiteren Schritte aufweist:

Validieren der Korrektheit der Klassifizierung der Messdaten des Einzelfehlers; und

wenn die Klassifizierung korrekt ist, Anlegen eines neuen Datensatzes bestehend aus der Einzelfehlermessung in Form eines Messdatenvektors sowie deren als korrekt validierten Einzelfehlertyp in der Datenbank für bekannte Einzelfehlertypen; oder

wenn die Klassifizierung nicht korrekt ist, Anlegen eines Datensatzes in einer Datenbank für unbekannte Einzelfehlertypen.

[0016] Dies hat den großen Vorteil, dass mögliche Irrtümer bei der Klassifizierung der Messdaten des Einzelfehlers aufgedeckt werden können. Zudem kann verhindert werden, dass Datensätze, die auf einem Irrtum beruhen, in die Datenbank für bekannte Einzelfehlertypen aufgenommen werden. Der Verfahrensschritt der Validierung kann hierbei sowohl zeitlich vor einer Entscheidung über Instandhaltungsmaßnahmen bzw. einer Einleitung von Instandhaltungsmaßnahmen als auch zeitlich danach durchgeführt werden. Besonders vorteilhaft ist es jedoch zunächst beispielsweise Baumaßnahmen einzuleiten und dann die Anwesenheit eines Bautrupps am Ort des Einzelfehlers zu nutzen, um validieren zu lassen, ob die Zuordnung des Einzelfehlertyps korrekt war. Das Risiko einer falschen Ressourcenzuweisung ist hierbei aufgrund der sehr verlässlichen Klassifizierung überschaubar. Bei einer korrekten Klassifizierung ermöglicht das Anlegen neuer Datensätze in der Datenbank für bekannte Einzelfehlertypen, dass die entsprechenden Einzelfehleroriginalmessdaten bei der Bestimmung des Einzelfehlertyps eines später gemessenen Einzelfehlers mit berücksichtigt werden können. Somit entsteht mit der Zeit ein solides "Einzelfehler->Einzelfehlertyp Repository" und das Verfahren kann auf lange Sicht hinweg kontinuierlich verbessert werden, denn mit den neuen Einzelfehleroriginalmessdaten und somit einer steigenden Quantität der Referenzmessungen wird das Training des Klassifikators stetig verbessert. Ebenso können die in der Datenbank für unbekannte Einzelfehlertypen angelegten Datensätze einer späteren weiteren Analyse unterzogen werden.

[0017] Erfindungsgemäß ist weiter vorgesehen, dass, insbesondere nachdem ein Datensatz in der Datenbank für unbekannte Einzelfehlertypen angelegt wurde, der Versuch unternommen wird, mit Hilfe eines Clusterverfahrens neue Fehlertypen zu finden. Sobald dann ein neuer Fehlertyp gefunden ist, wird ein neuer Datensatz in der Datenbank für bekannte Einzelfehlertypen angelegt. Dies ist vorteilhaft, da hierdurch für zukünftig gemessene Einzelfehler die Anzahl der in der Datenbank für bekannte Einzelfehlertypen verfügbaren und aufgeführten Typ-Klassen erhöht wird. Somit besteht für zu-

künftig gemessene Einzelfehler eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, deren jeweiligen Einzelfehlertyp auf Anhieb zu bestimmen, ohne einen Umweg über ein Clusterverfahren nehmen zu müssen. Auch ist die nachträgliche Aufnahme neuer Einzelfehlertypen sinnvoll, da davon auszugehen ist, dass mit ständiger technischer Fortentwicklung der Gleisoberbautechnik immer wieder neue, bisher unbekannte Fehlerquellen für Einzelfehler im Gleis geschaffen werden. Zweckmäßigerweise wird der neue Einzelfehlertyp vor dem Anlegen eines neuen Datensatzes jedoch noch validiert, um die Verlässlichkeit und Korrektheit des Datenbestands der Datenbank für bekannte Einzelfehlertypen zu gewährleisten. In dem Fall, dass kein neuer Fehlertyp ermittelt werden kann, verbleiben der oder die entsprechenden Datensätze zunächst in der Datenbank für unbekannte Einzelfehlertypen. Bezüglich näherer Einzelheiten zum Clusterverfahren wird auf die nachstehenden Ausführungen bezüglich der Identifizierung von Einzelfehlertypen in den Messdaten der Gleisvermessungen im Falle unbekannter Fehlerquellen verwiesen.

[0018] Gemäß einer Ausgestaltung der Erfindung wird die Validierung der Korrektheit der Klassifizierung der Messdaten des Einzelfehlers durch eine Begutachtung des Einzelfehlers durch einen oder mehrere Experten, vorzugsweise einen Bautrup, vor Ort durchgeführt. Dies bietet den Vorteil, dass bei einer manuellen Begutachtung des Einzelfehlers die Experten aufgrund ihrer Erfahrung, ihres Fachwissen sowie der Untersuchung des Gleises direkt vor Ort sehr schnell feststellen können, um welche Fehlerquelle es sich jeweils handelt. Über eine solche manuelle Validierung lässt sich somit in der Regel deutlich zuverlässiger als über computerimplementierte Validierungsverfahren feststellen, ob die Klassifizierung korrekt war oder nicht.

[0019] Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung weist der Verfahrensschritt des Identifizierens von Einzelfehlertypen die folgenden Schritte auf:

für bekannte Fehlerquellen, wie insbesondere gleisbauliche Elemente, Identifizieren von Einzelfehlertypen in den Messdaten der Gleisvermessungen anhand bekannter Wirkzusammenhänge und baulicher Kenntnisse der vermessenen Gleisstrecke; oder

für unbekannte Fehlerquellen, Identifizieren von Einzelfehlertypen in den Messdaten der Gleisvermessungen durch:

Isolieren von n Einzelfehlern mit jeweils einem Messdatenbereich ε links und rechts einer erhöhten Einzelfehleramplitude basierend auf einer Amplituden-Grenzwert-Betrachtung aus den Messdaten der gesamten vermessenen Gleisstrecke, wodurch n Einzelfehler-Messdatenvektoren entstehen;

Definieren einer Anzahl von m Clustern;

Anwenden von Clustering Algorithmen auf die n isolierten Einzelfehler unbekannten Einzelfehlertyps für m Cluster;

Bestimmen der Qualität des Clustering-Resultats mit Qualitätsmaßen wie der Interklassenheterogenität und/oder der Innerklassenhomogenität;

gegebenenfalls Erhöhen der Cluster-Anzahl m um eins und wiederholte Anwendung der Clustering Algorithmen sowie der Bestimmung der Qualität, wobei die bestimmte Qualität des Clustering-Resultats für m Cluster eine optimale Klassenanzahl k ergibt, was darauf hindeutet, dass es eine Anzahl von k verschiedenen, unbekannten Einzelfehlertypen gibt.

[0020] Bei den bekannten Fehlerquellen handelt es sich um Einzelfehlerarten, bei denen bereits ein Wirkzusammenhang bekannt ist und die oftmals auf gleisbauliche Elemente zurückzuführen sind. Zu den im Gleis vorkommenden Einzelfehlern gehören unter anderem gleisbauliche Elemente wie Weichenherzstücke oder Schienenstöße, die Messdaten produzieren, die nach geltender Norm Fehler sind (wenn die Amplitude groß genug wird). Von diesen Elementen ist die Position jeweils bekannt. Somit können Referenzkurven dieser Stellen leicht ermittelt werden, sollten sie schadhaft im Sinne der Amplitudenbetrachtung sein, indem die Position eines in den Messdaten identifizierten Einzelfehlers mit der projektierten Position eines dieser Bauteile übereinstimmt. Ist dies der Fall, liegt ein Messdatensatz eines schadhaften gleisbaulichen Elements vor. Ähnliches gilt für Streckenabschnitte an Übergangszonen. Da die Ursache für diesen Einzelfehlertyp im Wechsel der Steifigkeit des Untergrundes liegt, findet man diesen in der Regel - aber nicht ausschließlich - unmittelbar vor oder hinter ingenieursbaulichen Elementen (wie Tunnel, Brücken, etc.) entlang der Gleisstrecke. Da Wechsel in der Bettungssteifigkeit ebenfalls aus der Streckenprojektierung heraus bekannt sind, ist die Identifikation dieser Einzelfehler sowie das Ermitteln der typischen Referenzkurven analog zu den gleisbaulichen Elementen durchzuführen.

[0021] Hinsichtlich der unbekannten Fehlerquellen ist zu erwähnen, dass alle noch nicht beschriebenen Einzelfehlertypen nun weiter anhand eines Clusterverfahrens zu identifizieren sind. Hierbei geht man beispielsweise folgendermaßen vor. Zunächst isoliert man aus den Messdatensätzen einer gesamten Gleisstrecke alle diejenigen Messdaten, die im Sinne der Amplitudenbetrachtung schadhaft sind mit einem gewissen Epsilon von z.B. 15 Metern links und rechts der erhöhten Amplitude. Es entstehen n -viele Vektoren, die jeweils einen Fehler im Sinne der Amplituden-Grenzwert-Betrachtung dar-

stellen. Dann definiert man m-viele Cluster (z.B. zwei) und verwendet Clustering-Algorithmen wie beispielsweise den K-means-Algorithmus oder selbstorganisierende Karten. Anschließend misst man die Güte des Resultats aus dem vorherigen Clusterverfahren mit Qualitätsmaßen der Clusteranalyse wie beispielsweise der Interklassenheterogenität oder der Innerklassenhomogenität. Dann erhöht man m um eins und wiederholt den Vorgang. Die zuvor ermittelte Qualität der Clusterung für m-viele Cluster ergibt nun eine optimale Anzahl an Klassen. Diese identifizierte optimale Anzahl an Klassen k deutet nun darauf hin, dass es offensichtlich noch k-viele verschiedene nicht klassifizierte Einzelfehlertypen gibt. Somit lassen sich auch für zunächst unbekannte Einzelfehler bestimmte Einzelfehlertypen bestimmen. Vorteilhaft ist es, wenn dies durch Begutachtung von Experten vor Ort verifiziert wird. Wenn sich dann herausstellt, dass diese Einzelfehler im Feld tatsächlich eine eigene Klasse darstellen, sind diese in die Liste der Fehlertypen aufzunehmen und es kann mit der Ermittlung der entsprechenden Referenzmessungen fortgefahren werden.

[0022] Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung weist der Verfahrensschritt des Ermittels einer Referenzmessung für einen Einzelfehlertyp den folgenden Schritt auf:

Isolieren der Referenzmessung, bei bekannter Position einer Fehlerquelle, wie einem gleisbaulichen Element, aus vorhandenen Messdaten der vermessenen Gleisstrecke an der bekannten Position mit einem Messdatenbereich ε links und rechts der bekannten Position.

[0023] Wurden zuvor verschiedene Einzelfehlertypen identifiziert, so können von Elementen, bei denen die Position bekannt ist, die benötigten Referenzmessungen anhand der Position aus vorhandenen Messungen der vertikalen Gleisabweichung entlang der Gleisstrecke ausgeschnitten werden. Beispielsweise können anhand des Weichenverzeichnisses die Positionen der Weichenherzstücke ausgelesen werden. Isoliert man nun die Messwerte an diesen Positionen mit einem Epsilon von z.B. 15 Metern rechts und links des Weichenherzstücks bekommt man sehr komfortabel und unkompliziert Referenzmessungen für Weichenherzstücke. Die Wahl eines jeweils geeigneten Epsilon ist hierbei vorteilhaft, da man so sicherstellen kann, dass man einen maximalen Informationsgehalt der Einzelfehlerkurve wählt und abspeichert. Gleichermäßen kann man bei allen anderen gleisbaulichen Elementen (z.B. Tunnelleinfahrten und Tunnelausfahrten) vorgehen. Bei allen anderen Fehlern werden diese zunächst nach bekannter Amplituden-Vergleichs-Methode identifiziert und deren Messwerte mit einem Epsilon von ebenfalls z.B. 15 Metern links und rechts der erhöhten Amplitude aus dem Gesamtdatensatz ausgeschnitten. Die Referenzmessung bzw. die Messdatencharakteristik dieses Einzelfehlers liegt nun vor, jedoch ist sein Typ noch nicht bestätigt. Dies kann

beispielsweise durch fachkundiges Personal vor Ort geschehen, damit dieser Referenzkurve eindeutig ein Typ zugewiesen werden kann. Stellt sich bei der Begutachtung des Einzelfehlers beispielsweise heraus, dass der Einzelfehler aufgrund einer Ausspülung im Schotterbett durch Regen verursacht ist, könnte der nun bekannte Fehlertyp mit "Ausspülung durch Regen" bezeichnet werden.

[0024] Eine weitere Ausgestaltung der Erfindung ist, dass es sich bei den Messungen um Messungen der vertikalen Auslenkung der Gleise von ihrer Soll-Lage in Abhängigkeit von den Streckenkilometern, vorzugsweise unter Belastung der Gleise durch ein darauf fahrendes Messfahrzeug, und bei dem Einzelfehler um entsprechende vertikale Einzelfehler handelt. Wie bereits vorstehend erwähnt sind die möglichen Fehlerbilder im Gleisoberbau mannigfaltig. Von diesen mannigfaltigen Fehlerbildern treten vertikale Einzelfehler jedoch besonders häufig auf und haben aufgrund ihrer physikalischen Ausrichtung einen besonders spürbaren Einfluss auf die Fahrzeugreaktion eines Schienenfahrzeugs und somit auf den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit.

[0025] Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung werden zum Trainieren des Klassifikators und/oder zur Klassifizierung der Messdaten des Einzelfehlers Methoden des Data-Minings, Methoden der Multivariaten Datenanalyse, Methoden der Klassifikation und des überwachten, sowie unüberwachten Lernens, wie Entscheidungsbäume, Neuronale Netze, Support Vector Machines, Genetische Algorithmen, sowie k-Nächste-Nachbarn, kNN, -Algorithmen angewendet. Hierbei ist es besonders vorteilhaft, dass die zuvor erwähnten Verfahren ermöglichen, dass der Klassifikator mit jeder neuen Referenzmessung besser trainiert wird und sich somit auch die Qualität der Resultate der vom Klassifikator durchgeführten Klassifizierung mit der Zeit stetig verbessert. Die zuvor erwähnten Verfahren sind allerdings nur als Beispiele zu sehen.

[0026] Eine weitere Ausgestaltung der Erfindung ist, dass im Rahmen der Klassifizierung der Messdaten des Einzelfehlers Regressionsverfahren und/oder Korrelationsverfahren zur Beurteilung des Ähnlichkeitsgrads oder der Übereinstimmung zwischen der zu klassifizierenden Messkurve des Einzelfehlers und den Kurven der Referenzmessungen angewendet werden. Je nach Ordnung des jeweiligen Regressionsverfahrens lässt sich eine sehr gute funktionale Beschreibung der Messdaten des Einzelfehlers erzielen. Bezieht man das Resultat des Regressionsverfahrens in die weitere Beurteilung des Einzelfehlers mit ein, so kann man von einer umfangreichen Berücksichtigung der Einzelfehlerform sprechen. Besonders vorteilhaft ist auch die Anwendung von Korrelationsverfahren, da diese ermöglichen den Zusammenhang zwischen der zu klassifizierenden Messkurve und den Referenzmesskurven zu beleuchten.

[0027] Eine weitere Ausgestaltung der Erfindung ist, dass im Rahmen der Klassifizierung der Messdaten des Einzelfehlers ein oder mehrere Merkmale der Messkurve

des Einzelfehlers, wie Amplituden, Frequenzen, Steigungen, Integrale, oder die gesamte Form der Messkurve des Einzelfehlers berücksichtigt wird. Generell lässt sich mit einer zunehmenden Anzahl berücksichtigter Merkmale die Wahrscheinlichkeit für eine korrekte Klassifizierung des Einzelfehlers erhöhen. Besonders vorteilhaft ist daher ein möglichst ganzheitlicher Vergleich der Messkurve des Einzelfehlers mit den jeweiligen Referenzmesskurven. Welche Merkmale konkret in welchem Umfang berücksichtigt werden hängt allerdings auch stark vom jeweils verwendeten Algorithmus ab.

[0028] Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung weist der Verfahrensschritt des Entscheidens über Instandhaltungsmaßnahmen die folgenden Schritte auf:

Entscheiden über notwendige Ressourcen, insbesondere Personal-, Werkzeug-, Maschinen-, und Zeitressourcen, zur zielgerichteten Beseitigung des Einzelfehlertyps;

Entscheiden über notwendige Sicherungsmaßnahmen einer einzurichtenden Baustelle im Hinblick auf den zu beseitigenden Fehlertyp; und/oder

Treffen einer fehlerartspezifischen Prognose des voraussichtlichen Degradationsverhaltens des Einzelfehlers.

[0029] Da die Entscheidung über Instandhaltungsmaßnahmen bezogen auf den jeweils zu beseitigenden Einzelfehler auf Basis der erfolgten Klassifizierung des zu beseitigenden Einzelfehlers und somit auch frühzeitig auf Basis einer verfügbaren Information über den genauen Einzelfehlertyp getroffen werden kann, lassen sich bereits im Vorfeld möglicher Baumaßnahmen die notwendigen Ressourcen allokalieren. Hierbei ist entscheidend, dass jeder Einzelfehlertyp anders instandgehalten werden muss. Bei Hohllagen muss beispielsweise der Schotter gestopft werden, wozu eine Handstopfmaschine oder gar ein Stopfzug notwendig ist, der den liegenden Schotter wieder verdichtet. Bei Herzstückeinzelfehlern wird der Stahl in die passende Form geschliffen, wozu entsprechende Schleifmaschinen benötigt werden. Ferner müssen bei Arbeiten an Weichen speziell ausgebildete Experten wie Weichenmechaniker oder Weichenmeister anwesend sein. Da also für jeden Einzelfehlertyp andere Ressourcen (technische sowie Personal- oder Zeitressourcen) benötigt werden, ist es besonders vorteilhaft, dass bei dem vorliegenden Verfahren durch frühzeitige Kenntnis des Einzelfehlertyps bereits im Vorfeld einer Baumaßnahme die richtigen Entscheidungen über die notwendigen Ressourcen und die zugehörigen Sicherungsmaßnahmen getroffen werden können. Eine zeitverzögerte Entscheidung über die notwendigen Ressourcen erst nach einer manuellen Begutachtung und in Augenscheinnahme der Einzelfehlerstelle entfällt hier somit.

[0030] Die Information über den zu erwartenden Ein-

zelfehlertyp erlaubt weiterhin eine bessere Einplanung von Streckensperrungen, wodurch ein Verfügbarkeitsverlust der Strecke gering gehalten werden kann. Dies ist insbesondere der Fall, weil bekannt ist, wie lange eine Instandsetzung eines Einzelfehlers eines bestimmten Typs dauert. Im Zusammenhang mit dem Erfordernis von Streckensperrungen ist insbesondere zu berücksichtigen, dass Bautrupps im Gleis aufgrund der Arbeitssicherheit betrieblich gesichert werden müssen. Dies bedeutet, dass bei einer Instandhaltungsmaßnahme, je nach Größe des Vorgangs, Nachbargleise gesperrt beziehungsweise Langsamfahrstellen eingerichtet werden müssen. Werden nun aufgrund der Unkenntnis des genauen Einzelfehlertyps zu große Maschinen beordert, können die entsprechenden Sicherungsmaßnahmen auch zu groß ausfallen, was zu Verfügbarkeitsverlusten und der Erzeugung von Verspätungsminuten führt. All diese Probleme treten beim vorliegenden Verfahren nicht auf.

[0031] Ein weiterer Vorteil ist, dass man sich durch Kenntnis des Einzelfehlertyps und die dadurch mögliche, fehlerartspezifische Prognose des voraussichtlichen Degradationsverhaltens des Einzelfehlers nicht mehr wie bisher auf ein lineares Regressionsmodell bei der Prognose beschränken muss. Auf einen solchen linearen Zusammenhang ist man bisher häufig gekommen, indem man sich lediglich den Verlauf der Amplituden desselben Einzelfehlers an wenigen aufeinanderfolgenden Tagen angesehen hat. Dies war bisher auch sehr ungenau, da sich verschiedene Einzelfehlertypen auch in ihrem Degradationsverhalten unterscheiden können. Denn ein defekter Schienenstoß kann sich mit der Zeit auch logarithmisch entwickeln, da er mit der Zeit von den Zügen abgefahren wird. Eine Hohllage dagegen wird immer schlimmer und zerstört die benachbarte Schotterung bei Betriebsbelastung, wobei sich dieser Einzelfehler auch exponentiell verhalten kann. Solche fehlerartspezifischen Prognosen der Entwicklung von Einzelfehlern bieten also den Vorteil, dass beispielsweise bei zwei unterschiedlichen Einzelfehlertypen die Entscheidung getroffen werden kann, trotz gleicher Einzelfehleramplitude der beiden Einzelfehler, eine Beseitigung des einen Einzelfehlertyps aufgrund seiner voraussichtlichen Entwicklung gegenüber einer Beseitigung des anderen Einzelfehlertyps vorzuziehen. Eine solche Einschätzung, wie lange die Beseitigung eines Einzelfehlers noch hinausgezögert werden kann ist insbesondere im Hinblick auf eine Minimierung der Fahrplanausfälle und im Hinblick auf das jährliche Finanzbudget der Bahnunternehmen von Vorteil.

[0032] Vorteilhafterweise kann die Entscheidung über Instandhaltungsmaßnahmen auch Überlegungen und Entscheidungen mit Blick auf den Fahrkomfort und die Fahrgastsicherheit beinhalten. Das vorliegende Verfahren ermöglicht es auch, dass ein Instandhaltungsmanager frühzeitig über den genauen Einzelfehlertyp informiert wird. Instandhaltungsmanager müssen auf gewissen Informationen basierende Entscheidungen treffen, etwa wann, wo und wie eine Gleisstrecke erneuert oder

instandgehalten wird. Durch das vorliegenden Verfahren wird das zur Verfügung stehende Informationsangebot erweitert und die Entscheidungsfindung des Instandhaltungsmanagers optimiert. So kann der Instandhaltungsmanager beispielsweise die Bausicherung frühzeitig optimal dimensionieren. Daraus resultieren große positive Effekte in Bezug auf Kostenersparnisse während des Instandhaltungsprozesses.

[0033] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist nicht nur durch das vorstehend beschriebene Verfahren, sondern ferner auch durch eine in diesem Zusammenhang eingesetzte Datenbank gelöst. Die erfindungsgemäße Datenbank zur Optimierung der Gleisoberbauinstandhaltung umfasst Datensätze, die jeweils aus Referenzfehlermesswerten eines Einzelfehlers, der im Gleis vorkommt und bei Gleisvermessungen hervortritt, in Form eines Messdatenvektors sowie einem zugeordneten Einzelfehlertyp bestehen, wobei mit den Datensätzen ein Klassifikator trainiert wird, um später anhand der Datensätze neue Messdaten eines Einzelfehlers zu klassifizieren und wobei zumindest teilweise basierend auf dieser Klassifizierung über Instandhaltungsmaßnahmen bezogen auf den Einzelfehler entschieden wird. Bezüglich der Vorteile und weiteren Ausgestaltungen einer solchen Datenbank wird auf die vorstehenden Ausführungen in Rahmen der Beschreibung des Verfahrens verwiesen. Insbesondere soll aber erwähnt sein, dass der systematische Aufbau der Datenbank mit Referenzfehlermesswerten und zugeordnetem Einzelfehlertyp zusammen mit einer Möglichkeit die Datenbank durch Hinzufügen neuer Datensätze ständig zu erweitern eine kontinuierliche Verbesserung des Trainings des Klassifikators und somit eine immer zuverlässigere Bestimmung von Einzelfehlertypen ermöglicht. Dies hängt mit der steigenden Quantität der Originalmessdaten von Referenzmessungen zusammen, die bei den Trainings- und Klassifizierungsverfahren berücksichtigt werden. Es sei noch erwähnt, dass es sich bei der Datenbank um eine Datenbank für bekannte Einzelfehlertypen handelt. Eine entsprechende Datenbank für unbekannte Einzelfehlertypen weist ähnliche Datensätze mit Referenzfehlermesswerten in Form eines Messdatenvektors auf, dessen Einzelfehlertyp allerdings zunächst unbestimmt bleibt.

[0034] Mittels dem oben beschriebenen Verfahren wird also erstmalig ein Verfahren zur Optimierung der Gleisoberbauinstandhaltung bereitgestellt, bei dem für jeden neu gemessenen Einzelfehler der Einzelfehlertyp anhand bereits vorhandener Einzelfehleroriginalmessdaten bestimmt werden kann. Des Weiteren wird erstmalig eine in diesem Zusammenhang einsetzbare Datenbank bereitgestellt.

[0035] In den nachfolgenden Zeichnungen ist die vorliegende Erfindung anhand schematisch dargestellter Ausführungsbeispiele näher veranschaulicht. Darin zeigen

Figur 1 ein beispielhaftes Messergebnis der vertika-

len Gleisauslenkung entlang einer vermessenen Gleisstrecke;

- Figur 2 eine beispielhafte Auflistung von möglichen Datensätzen in einer Datenbank für bekannte Einzelfehlertypen;
- Figur 3 ein erstes Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens;
- Figur 4 ein zweites Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens; und
- Figur 5 eine schematische Übersicht der Ausführungsbeispiele aus den Figuren 3 und 4 mit weiteren Aspekten des erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0036] Die Figur 1 zeigt ein beispielhaftes Messergebnis der vertikalen Gleisauslenkung in mm entlang einer vermessenen Gleisstrecke, d.h. in Abhängigkeit von den abgefahrenen Streckenkilometern der Gleisstrecke. Betrachtet man den Verlauf der Messkurve, findet man einige deutliche Erhöhungen und Absenkungen der vertikalen Gleisauslenkung auf. Für eine Vielzahl dieser Erhöhungen und Absenkungen ist ein Wirkzusammenhang, also der jeweilige Typ, die jeweilige Ursache oder die jeweilige Fehlerquelle, bekannt. Von links aus betrachtet tritt die erste Erhöhung W aufgrund einer bekannten Position eines Weichenherzstücks, die zweite Erhöhung B und die erste Absenkung T aufgrund der bekannten Positionen von Tunnelein- und ausfahrten sowie die beiden letzten Erhöhungen Ü (bzw. Kombinationen aus einer Erhöhung und einer Absenkung) aufgrund einer bekannten Position eines Bahnübergangs auf. Nach der Amplitudenbetrachtung sind insbesondere die Erhöhungen oder Absenkungen per Definition als Einzelfehler anzusehen, die den jeweils geltenden Grenzwert G überschreiten. Bei dem beispielhaften Messergebnis der Figur 1 liegt der Amplitudengrenzwert G bei ± 11 mm. Die Messdaten dieser Einzelfehler müssen nun ausgeschnitten werden, um näher untersucht zu werden. Auffällig ist hierbei vor allem die dritte Erhöhung Z von links aus betrachtet, da es sich hierbei um einen Einzelfehler auf freier Strecke mit unbekanntem Einzelfehlertyp handelt. Da seine Ursache nicht bekannt ist, muss entsprechend eine Begutachtung vorgenommen werden.

[0037] Die Figur 2 zeigt eine beispielhafte Auflistung von möglichen Datensätzen in einer Datenbank für bekannte Einzelfehlertypen. In der linken Spalte, dem ersten Feld, sind die Datenpunkte der Einzelfehler als Vektoren unterschiedlicher Länge abgespeichert. In der mittleren Spalte, dem zweiten Feld, sind die Einzelfehlertypen abgespeichert, wohingegen in der rechten Spalte die Datensätze der Übersichtlichkeit halber durchnummeriert sind. Die hier aufgeführten Einzelfehlertypen (Tunnel, Bahnübergang, Weichenherzstück) sind rein

beispielhaft.

[0038] Die Figur 3 zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens. Hier wird davon ausgegangen, dass bereits eine Initialisierungsphase stattgefunden hat und somit bereits eine Datenbank für bekannte Einzelfehlertypen vorhanden ist. Das Verfahren beginnt mit der Identifikation eines Einzelfehlertyps durch eine klassische Amplitudenbetrachtung (Schritt 1.). Hierbei wird lediglich auf die Überschreitung eines bestimmten Amplitudengrenzwerts durch eine Erhöhung in der Messkurve der vertikalen Gleisablenkung abgestellt. Im nächsten Schritt (Schritt 2.) wird der für den Einzelfehler maßgebliche Messbereich aus der Gesamtmessung extrahiert. Danach wird der extrahierte Messbereich des Einzelfehlers anhand der Datensätze in der Datenbank klassifiziert (Schritt 3.). In diesem Ausführungsbeispiel handelt es sich laut Klassifizierung um den Einzelfehlertyp B. Im nächsten Schritt erfolgt eine Validierung der Korrektheit der Klassifizierung (Schritt 4.). Da in diesem Ausführungsbeispiel die Klassifizierung als korrekt validiert wurde, wird im letzten Schritt (Schritt 5.) ein entsprechender neuer Datensatz in der Datenbank für bekannte Einzelfehlertypen angelegt.

[0039] Die Figur 4 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens. Hier wird ebenfalls davon ausgegangen, dass bereits eine Initialisierungsphase stattgefunden hat und somit bereits eine Datenbank 1 für bekannte Einzelfehlertypen vorhanden ist. Das Verfahren beginnt mit einer Messfahrt (siehe Schritt I.), in der Gleisablenkungen entlang der Messstrecke erfasst werden. Anschließend werden Einzelfehler aus der Gesamtmessung (siehe Schritt II.). In einem nächsten Schritt werden die Messdaten der Einzelfehler anhand der Datensätze in der Datenbank 1 klassifiziert (siehe Schritt III.). Anschließend wird die Korrektheit der Klassifizierung validiert (siehe Schritt IV.). Wenn die Klassifizierung als korrekt validiert wird, wird ein neuer Datensatz beziehungsweise werden neue Datensätze in der Datenbank 1 angelegt (siehe Schritt V.). Wenn die Klassifizierung allerdings nicht als korrekt validiert wird, kommt es zu einem Clusterverfahren (Schritt VI.), um neue Einzelfehlertypen zu identifizieren. In dem Diagramm repräsentiert jedes x einen umklassifizierten Einzelfehler n in einem n-dimensionalen Merkmalsraum. Hierbei wird zunächst eine Anzahl von Clustern definiert und dann ein Cluster-Algorithmus auf die unklassifizierten Einzelfehler für die definierte Clusteranzahl angewendet (siehe Schritt VI.1.). Abschließend wird die Qualität des Resultats des angewendeten Cluster-Algorithmus mit Qualitätsmaßen wie der Innerklassenhomogenität und der Interklassenheterogenität bestimmt (siehe Schritt VI.2.). Die bestimmte Qualität ergibt nun eine optimale Anzahl von 3 Klassen, was wiederum darauf hindeutet, dass 3 noch unbekannte Einzelfehlertypen existieren (siehe Schritt VI.3.). In einem letzten Schritt wird die neue Fehlerart im Feld validiert bevor sie in die Datenbank 1 aufgenommen wird (siehe Schritt VI.4.).

[0040] Die Figur 5 zeigt eine schematische Übersicht

der Ausführungsbeispiele aus den Figuren 3 und 4 mit weiteren Aspekten des erfindungsgemäßen Verfahrens. Die schematische Übersicht beginnt mit einer Initialisierungsphase 501 innerhalb der Einzelfehlertypen identifiziert und entsprechende Referenzmessungen ermittelt werden. Einen Abschluss der Initialisierungsphase bildet das Anlegen von Datensätzen in einer Datenbank 502 mit Referenzmessdaten für Einzelfehler deren Typ bekannt ist. Die Identifikation von Einzelfehlern und die Extraktion von Messwerten der Einzelfehler aus einem Gesamtmessdatensatz eines Messzuges (siehe 503, 504) wurde bereits in den Figuren 3 und 4 näher beschrieben. Wie ebenfalls im Zusammenhang mit den Figuren 3 und 4 näher beschrieben, klassifiziert ein Klassifikator 505 die Messdaten jedes Einzelfehlers anhand der Datensätze in der Datenbank 502. Auf Basis dieser Klassifizierung wird dann eine optimale Instandsetzung des Einzelfehlers eingeleitet (siehe 506). Anschließend wird die Korrektheit der Klassifizierung validiert (siehe 507). Wenn die Klassifizierung korrekt ist wird ein weiterer Referenzdatensatz zur Datenbank 502 hinzugefügt (siehe 508), um die Klassifikation für die Zukunft weiter verbessern zu können. Wenn die Klassifizierung inkorrekt war wird ebenfalls ein Referenzdatensatz hinzugefügt (siehe 509), allerdings zu einer Datenbank 510 mit Referenzmessdaten für Einzelfehler, deren Typ nicht bekannt ist. In einem nächsten Schritt wird der Versuch unternommen mit Hilfe eines Clusterverfahrens, welches im Zusammenhang mit der Figur 4 näher beschrieben ist, neue Fehlertypen zu finden (siehe 511). Nach einer Validierung, ob tatsächlich ein neuer Fehlertyp gefunden wurde, (siehe 512) wird ein entsprechender Einzelfehler entweder zur Datenbank 502 mit Referenzmessdaten für Einzelfehler, deren Typ bekannt ist, hinzugefügt (siehe 513), oder er verbleibt weiterhin in der Datenbank 510 mit Referenzmessdaten für Einzelfehler, deren Typ nicht bekannt ist (siehe 514).

40 Patentansprüche

1. Verfahren zur Optimierung der Gleisoberbauinstandhaltung, die Schritte aufweisend:

Identifizieren (501) von im Gleis vorkommenden und bei Gleisvermessungen hervortretenden Einzelfehlertypen;
Ermitteln (501) von Referenzmessungen für jeden dieser Einzelfehlertypen;
Anlegen (501) von Datensätzen bestehend aus jeweils einer Referenzmessung in Form eines Messdatenvektors sowie deren zugeordneter Einzelfehlertyp in einer Datenbank (1, 502) für bekannte Einzelfehlertypen;
Trainieren eines Klassifikators (505) mit den angelegten Datensätzen; Klassifizieren von neuen Messdaten (503, 504) eines Einzelfehlers anhand der angelegten Datensätze durch den

- Klassifikator (505); und Entscheiden (506) über Instandhaltungsmaßnahmen bezogen auf den Einzelfehler zumindest teilweise basierend auf der Klassifizierung der Messdaten (503, 504) des Einzelfehlers. 5
2. Verfahren nach Anspruch 1, weiter die Schritte aufweisend:
- Validieren (507) der Korrektheit der Klassifizierung der Messdaten (503, 504) des Einzelfehlers; und 10
- wenn die Klassifizierung korrekt ist, Anlegen (508) eines neuen Datensatzes bestehend aus der Einzelfehlermessung in Form eines Messdatenvektors sowie deren als korrekt validierten Einzelfehlertyp in der Datenbank (1, 502) für bekannte Einzelfehlertypen; oder 15
- wenn die Klassifizierung nicht korrekt ist, Anlegen (509) eines Datensatzes in einer Datenbank (510) für unbekannte Einzelfehlertypen. 20
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** nach dem Anlegen (509) eines Datensatzes in der Datenbank (510) für unbekannte Einzelfehlertypen der Versuch (511) unternommen wird mit Hilfe eines Clusterverfahrens neue Fehlertypen zu finden und, sobald ein neuer Fehlertyp gefunden ist, ein neuer Datensatz in der Datenbank (1, 502) für bekannte Einzelfehlertypen angelegt (513) wird. 25 30
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Validierung (507) der Korrektheit der Klassifizierung der Messdaten (503, 504) des Einzelfehlers durch eine Begutachtung des Einzelfehlers durch einen oder mehrere Experten, vorzugsweise einen Bautrup, vor Ort durchgeführt wird. 35 40
5. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Identifizieren (501) von Einzelfehlertypen die Schritte aufweist:
- für bekannte Fehlerquellen, wie insbesondere gleisbauliche Elemente, Identifizieren von Einzelfehlertypen in den Messdaten der Gleisvermessungen anhand bekannter Wirkzusammenhänge und baulicher Kenntnisse der vermessenen Gleisstrecke; oder 45 50
- für unbekannte Fehlerquellen, Identifizieren von Einzelfehlertypen in den Messdaten der Gleisvermessungen durch:
- Isolieren von n Einzelfehlern mit jeweils einem Messdatenbereich ε links und rechts einer erhöhten Einzelfehleramplitude basierend auf einer Amplituden-Grenzwert- 55
- Betrachtung aus den Messdaten der gesamten vermessenen Gleisstrecke, wodurch n Einzelfehler-Messdatenvektoren entstehen;
- Definieren einer Anzahl von m Clustern;
- Anwenden von Clustering Algorithmen auf die n isolierten Einzelfehler unbekannten Einzelfehlertyps für m Cluster;
- Bestimmen der Qualität des Clustering-Resultats mit Qualitätsmaßen wie der Interklassenheterogenität und/oder der Innerklassenhomogenität;
- gegebenenfalls Erhöhen der Cluster-Anzahl m um eins und wiederholte Anwendung der Clustering Algorithmen sowie der Bestimmung der Qualität, wobei die bestimmte Qualität des Clustering-Resultats für m Cluster eine optimale Klassenanzahl k ergibt, was darauf hindeutet, dass es eine Anzahl von k verschiedenen, unbekannten Einzelfehlertypen gibt.
6. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Ermitteln (501) einer Referenzmessung für einen Einzelfehlertyp den Schritt aufweist:
- Isolieren der Referenzmessung, bei bekannter Position einer Fehlerquelle, wie einem gleisbaulichen Element, aus vorhandenen Messdaten der vermessenen Gleisstrecke an der bekannten Position mit einem Messdatenbereich ε links und rechts der bekannten Position.
7. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** es sich bei den Messungen um Messungen der vertikalen Auslenkung der Gleise von ihrer Soll-Lage in Abhängigkeit von den Streckenkilometern, vorzugsweise unter Belastung der Gleise durch ein darauf fahrendes Messfahrzeug, und bei dem Einzelfehler um entsprechende vertikale Einzelfehler handelt. 40
8. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zum Trainieren des Klassifikators (505) und/oder zur Klassifizierung der Messdaten (503, 504) des Einzelfehlers Methoden des Data-Minings, Methoden der Multivariaten Datenanalyse, Methoden der Klassifikation und des überwachten, sowie unüberwachten Lernens, wie Entscheidungsbäume, Neuronale Netze, Support Vector Machines, Genetische Algorithmen, sowie k-Nächste-Nachbarn, kNN, -Algorithmen angewendet werden. 45 50
9. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Rahmen der Klassifizierung der Messdaten (503, 504) des Ein-

zelfehlers Regressionsverfahren und/oder Korrelationsverfahren zur Beurteilung des Ähnlichkeitsgrads oder der Übereinstimmung zwischen der zu klassifizierenden Messkurve des Einzelfehlers und den Kurven der Referenzmessungen angewendet werden. 5

10. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Rahmen der Klassifizierung der Messdaten (503, 504) des Einzelfehlers ein oder mehrere Merkmale der Messkurve des Einzelfehlers, wie Amplituden, Frequenzen, Steigungen, Integrale, oder die gesamte Form der Messkurve des Einzelfehlers berücksichtigt wird. 10

15

11. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** Entscheiden (506) über Instandhaltungsmaßnahmen die Schritte aufweist: 20

20

Entscheiden über notwendige Ressourcen, insbesondere Personal-, Werkzeug-, Maschinen-, und Zeitressourcen, zur zielgerichteten Beseitigung des Einzelfehlertyps;

Entscheiden über notwendige Sicherungsmaßnahmen einer einzurichtenden Baustelle im Hinblick auf den zu beseitigenden Fehlertyp; und/oder 25

Treffen einer fehlerartspezifischen Prognose des voraussichtlichen Degradationsverhaltens des Einzelfehlers. 30

30

12. Datenbank (1, 502) zur Optimierung der Gleisoberbauinstandhaltung mit Datensätzen jeweils bestehend aus Referenzfehlermesswerten eines Einzelfehlers, der im Gleis vorkommt und bei Gleisvermessungen hervortritt, in Form eines Messdatenvektors sowie einem zugeordneten Einzelfehlertyp, wobei mit den Datensätzen ein Klassifikator (505) trainiert wird, um später anhand der Datensätze neue Messdaten (503, 504) eines Einzelfehlers zu klassifizieren und wobei zumindest teilweise basierend auf dieser Klassifizierung über Instandhaltungsmaßnahmen bezogen auf den Einzelfehler entschieden wird (506). 35

35

40

45

50

55

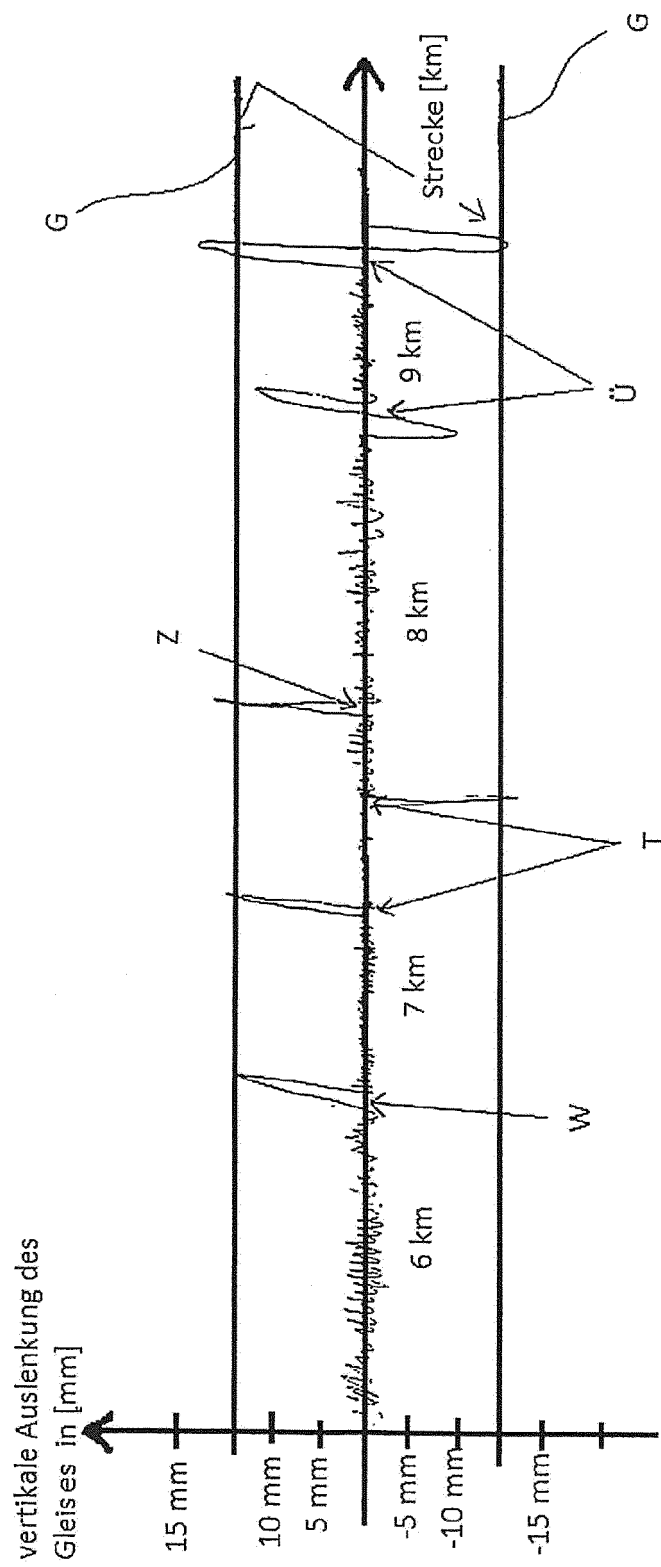


Fig. 1

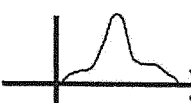
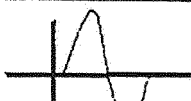
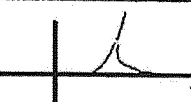
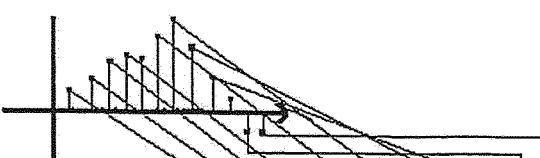
Datensätze		
Datenvektor	Fehlertyp	Datensatz
 Vector: = [1, 3, 7, ...]	Übergangszone: Tunnel	1
 Vector: = [2, 8, 9, ...]	Übergangszone: Tunnel	2
 Vector: = [...]	Übergangszone: Bahnübergang	3
 Vector: = [...]	Weichenherzstück	4
 Vector: = [...]	Weichenherzstück	5
 Vector: = [3, 4, 5, 6, 5, 9, 11, 8, 5, 3, -2, -3]		

Fig. 2

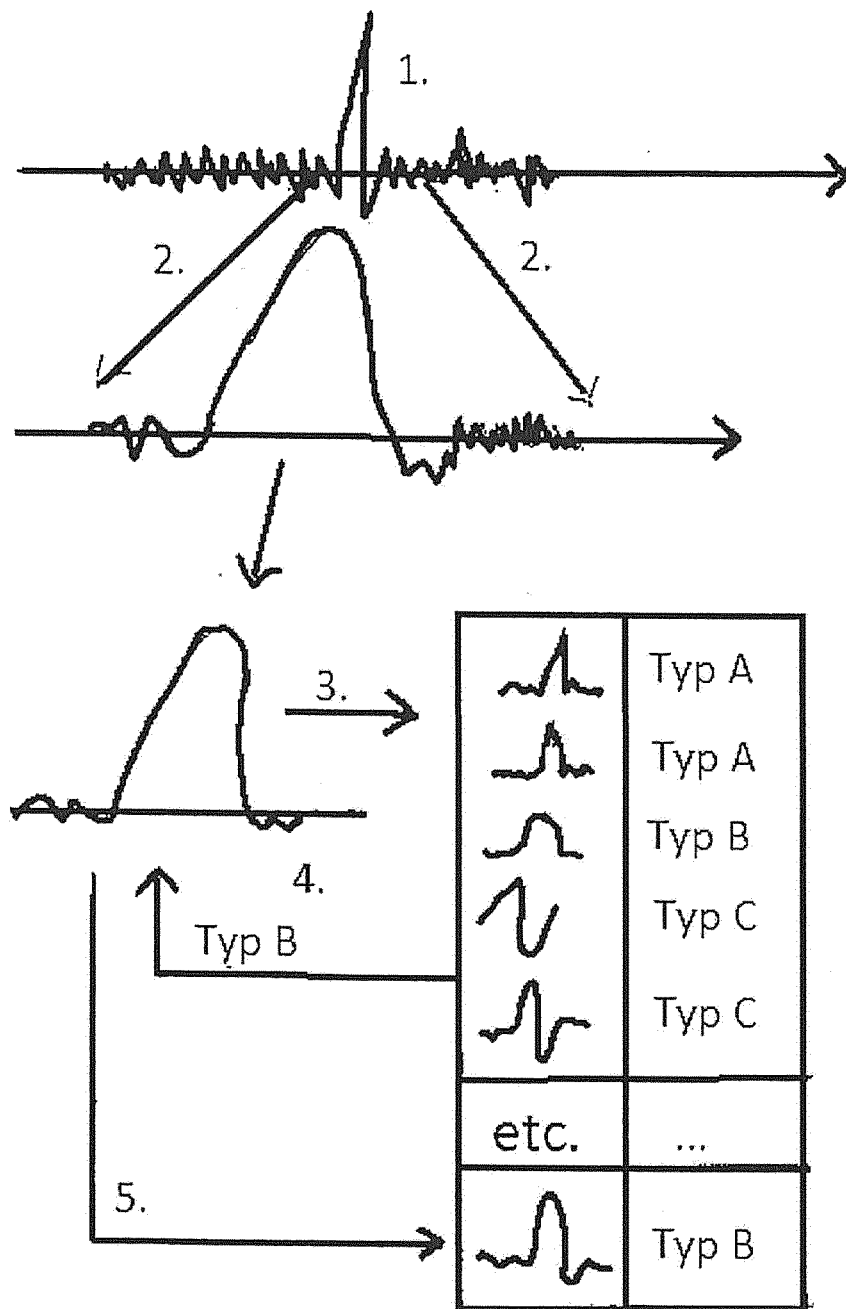


Fig. 3

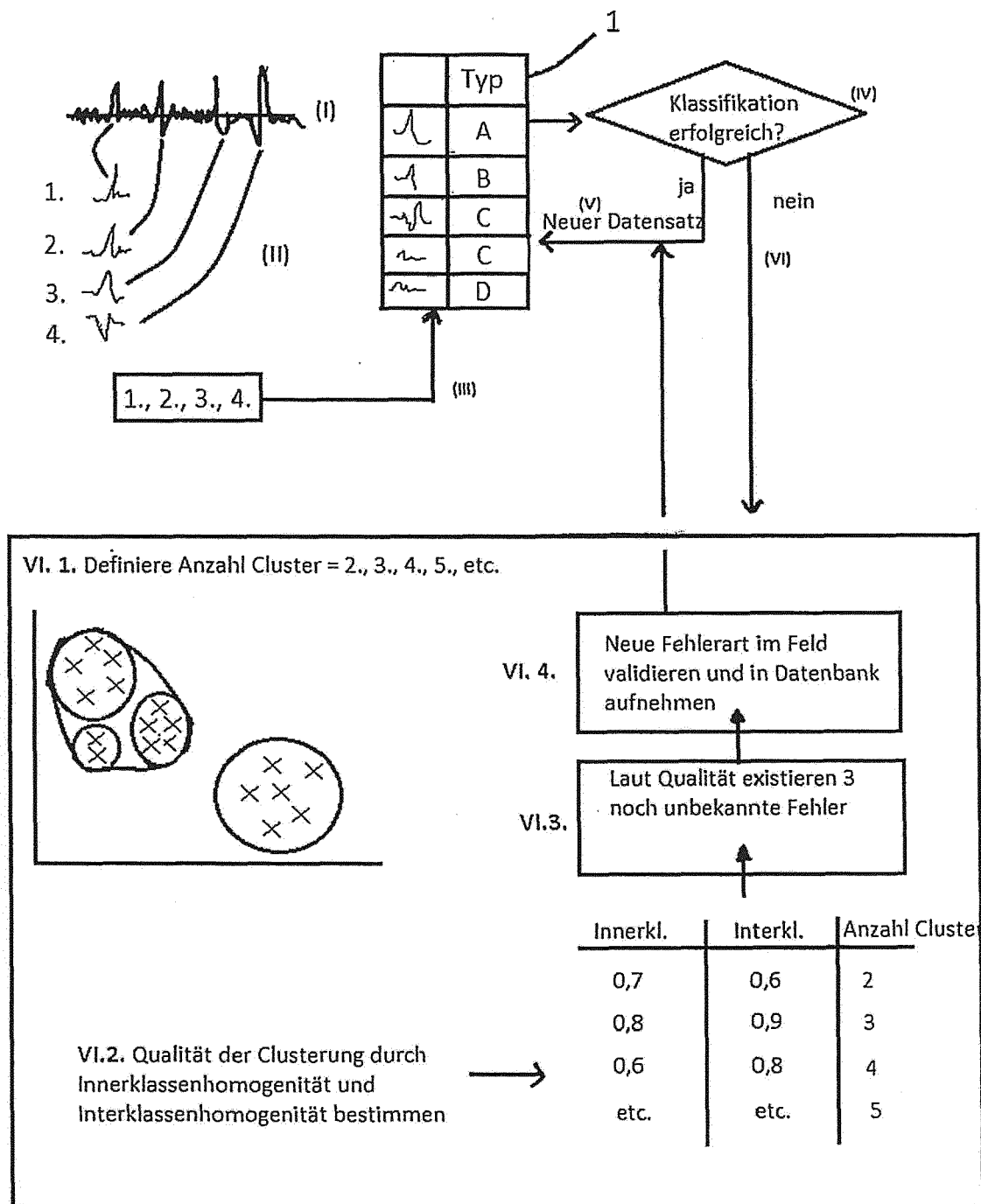


Fig. 4

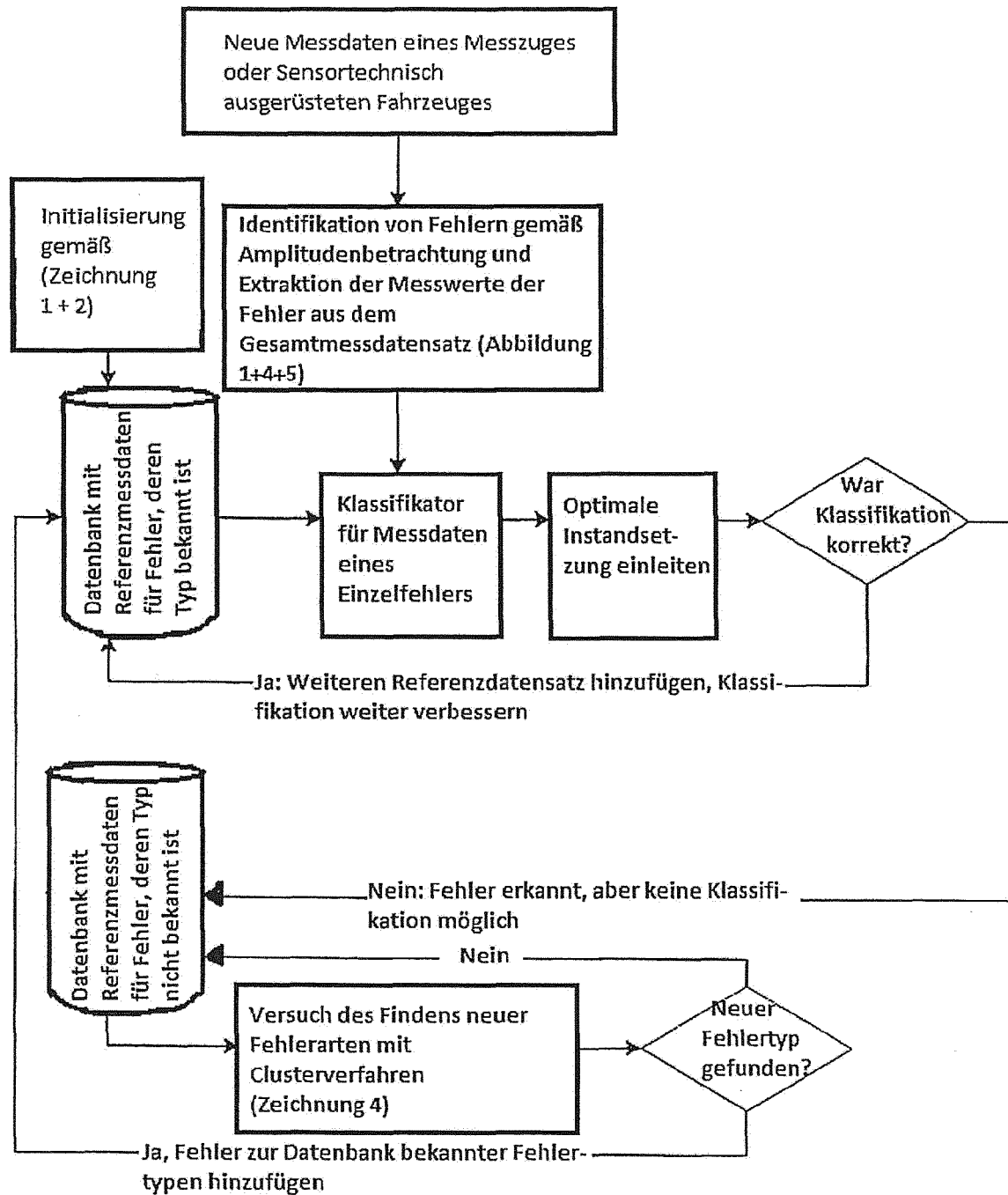


Fig. 5

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 1977950 B1 [0008]
- KR 102011134547 A [0008]
- DE 102011101226 A1 [0009]
- EP 1271364 A2 [0009]