

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 60148/2023 (51) Int. Cl.: **E01B 35/00** (2006.01)
(22) Anmeldetag: 28.08.2023 **E01B 27/17** (2006.01)
(43) Veröffentlicht am: 15.03.2025 **E01B 29/04** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
EP 4134485 A1
WO 2018082798 A1

(71) Patentanmelder:
HP3 Real GmbH
1130 Wien (AT)

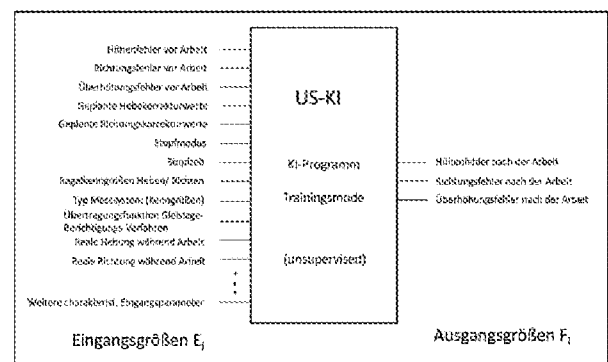
(72) Erfinder:
Lichtberger Bernhard
1030 Wien (AT)
Schmitzberger Heinrich
4048 Puchenu (AT)

(74) Vertreter:
Hübscher & Partner Patentanwälte GmbH
4020 Linz (AT)

(54) **Verfahren zur Verbesserung der Gleisberichtigungsverfahren**

(57) Es wird ein Verfahren zur Ermittlung der Vorhersage der Restfehler von mindestens einer gleisfahrbaren Gleisstopfmaschine, die nach einem Gleislageberichtigungsverfahren arbeitet und wesentliche Eingangsgrößen (E_i) und Ausgangsgrößen (F_i) nach Stopfeinsätzen in einer Datenbank speichert, vorgeschlagen, welches in ein unsupervised Künstliche Intelligenz Programm (US-KI) die gespeicherten Eingangsparameter (E_i) und gespeicherten Ausgangsgrößen (F_i) von Stopfeinsätzen einliest und dieses damit trainiert. Erfindungsgemäß wird das trainierte unsupervised Künstliche Intelligenz Programm (US-KI-T) dazu benutzt vor der Durchführung einer Stopfarbeit die Restfehler (FK_i) nach der Arbeit vorherzusagen. Damit kann die Stopfarbeit im Voraus für ein optimales Arbeitsergebnis vorbereitet werden.

Fig. 3



(345268.4) HEL

Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren zur Ermittlung der Vorhersage der Restfehler von mindestens einer gleisfahrbaren Gleisstopfmaschine, die nach einem Gleislageberichtigungsverfahren arbeitet und wesentliche Eingangsgrößen (E_i) und Ausgangsgrößen (F_i) nach Stopfeinsätzen in einer Datenbank speichert, vorgeschlagen, welches in ein unsupervised Künstliche Intelligenz Programm (US-KI) die gespeicherten Eingangsparameter (E_i) und gespeicherten Ausgangsgrößen (F_i) von Stopfeinsätzen einliest und dieses damit trainiert. Erfindungsgemäß wird das trainierte unsupervised Künstliche Intelligenz Programm (US-KI-T) dazu benutzt vor der Durchführung einer Stopfarbeit die Restfehler (FK_i) nach der Arbeit vorherzusagen. Damit kann die Stopfarbeit im Voraus für ein optimales Arbeitsergebnis vorbereitet werden.

(Fig. 3)

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Verbesserung der Gleisberichtigungsverfahren, welche zur Gleislageverbesserung durch Gleisstopfmaschinen angewendet werden.

Die meisten Gleise für die Eisenbahn sind als Schotteroberbau ausgeführt. Die Schwellen liegen im Schotter. Durch die wirkenden Radkräfte der darüberfahrenden Züge werden unregelmäßige Setzungen im Schotter und Verschiebungen der seitlichen Lagegeometrie des Gleises hervorgerufen. Durch die Setzungen des Schotterbettes treten Fehler in der Längshöhe, der Überhöhung (im Bogen), der Verwindung und der Richtlage auf. Werden bestimmte Komfortgrenzwerte oder Sicherheitsgrenzwerte dieser geometrischen Größen überschritten, werden Instandhaltungsarbeiten durchgeführt. Eine Gleisstopfmaschine verbessert die Gleisgeometrie, die durch die Belastung der Züge verschlechtert wurde. Dazu wird das Gleis mittels elektrohydraulisch gesteuerten Hebe- Richteinrichtungen in die Gleissollposition gehoben und gerichtet und in dieser Lage durch Verdichten (Stopfen) des Schotters unter den Schwellen fixiert.

Zur Führung der Berichtigungswerkzeuge der Oberbaumaschine werden überwiegend Mess- und Steuerungssysteme nach dem Dreipunkt-Verfahren eingesetzt. Neben dem Dreipunkt-Verfahren sind auch andere bekannt, wie das Sekanten-Verfahren, das Vier-Punkt-Verfahren oder das Zweisehnenverfahren. Die Praxis zeigt, dass die Gleislagen zwar verbessert, aber die theoretisch möglichen Verbesserungen bei Weitem nicht erreicht werden. Die Gleislagefehler werden typischerweise nur zwischen 30-50% verringert. Die Form und Lage der Gleislagefehler bleiben dabei meist erhalten, nur die Amplituden der Fehler

verringern sich. Zusätzlich treten Phasenverschiebungen (örtliche Verschiebung der berichtigten Gleisfehler zu deren ursprünglichen Lage) auf. Die Korrektoreigenschaften der Gleisberichtigungs-Verfahren hängen von der Wellenlänge ab und werden durch eine Übertragungsfunktion beschrieben. Diese zeigt wie die Amplitude und die Phasenlage der Fehler bestimmter Wellenlängen verändert werden.

Damit das Gleis nach derartigen Gleisgeometrieverbesserungsarbeiten wieder für den Zugsbetrieb freigegeben werden kann, sind die Eisenbahnoberbaumaschinen mit so genannten Abnahmemessanlagen und einem Abnahmeschreiber ausgestattet. Mit diesem Abnahmeschreiber werden die verbleibenden Fehler aufgezeichnet. Für die Freigabe sind vorgegebene Toleranzen der Gleislagefehler zu unterschreiten.

Je kleiner die Restfehler nach einer Instandhaltungsarbeit sind, desto geringer sind die wechselwirkenden Kräfte zwischen Rad und Schiene durch die Züge, desto langsamer verschlechtert sich die Gleisgeometrie, umso länger die Dauerhaftigkeit der Gleislage. Es ist daher wünschenswert, die Gleisgeometrie möglichst an die Soll-Lage heranzuführen, weil damit anschließend erhebliche Kosten und Aufwand gespart werden können.

Die Sollgeometrien der Eisenbahngleise stehen als Gleislagepläne zur Verfügung und werden im Gleisgeometrieführungscomputer der Stopfmaschine zur Führung der Maschine genutzt. Vor der Arbeit wird die aktuelle Gleislage nach verschiedenen Methoden (maschinell oder mit handgeschobenen Geräten) aufgemessen. Diese werden mit der Soll-Lage verglichen und daraus werden die Gleislagefehler ermittelt. Um diese zu beheben, werden Hebewerte und Richtwerte festgelegt und dem Gleisgeometrieführungscomputer der Stopfmaschine übergeben.

Das maschinelle Gleismesssystem beispielsweise nach dem Drei-Punkt-Verfahren besteht aus drei Messwagen. Der vordere und der hintere spannen eine Sehne auf (Stahlsehne oder optische Sehne. Beim mittleren Messwagen, der sich im Bereich

des Hebe-Richt-Aggregates befindet, wird die aktuelle Pfeilhöhe, Längshöhe und Überhöhung gemessen. Der Gleislagecomputer gibt den Soll-Richtwert (Pfeilhöhe), Soll-Hebung (Längshöhe) und Soll-Überhöhung an dieser Stelle vor. Die Maschinensteuerung regelt nun die Aktoren des Hebe-Richt-Aggregates so, dass die Differenz zwischen Soll- und Istwerten gleich null wird. Mit den Korrekturwerten für Hebung und Richtung wird das vordere Ende der Maschinenmesseinrichtung auf der Gleis-Sollgeometrie geführt und das hintere Ende auf dem bereits berichtigten Gleis. Die Position der Stopfmaschine in der Gleislängsachse wird mit einem Odometer oder mittels Satellitenmessdaten bestimmt. Dieses Verfahren wird als Dreipunkt-Verfahren bezeichnet.

Nachteilig bei der derzeitigen Anwendung des Dreipunkt- und anderer bekannter Verfahren sind die entgegen der theoretisch erwartbaren Verbesserung der Gleislage die nicht zufriedenstellende Reduktion der Gleislagefehler um nur etwa 30-50%. Mit dieser mangelhaften Funktion der bekannten Verfahren wird das Aufwands- und Kosteneinsparungspotential, welches sich durch eine bessere Anwendung ergeben würde, nicht ausgeschöpft. Einer der Gründe dieser mangelhaften Funktion ist (beispielhaft für das Drei-Punkt-System), dass das hintere Sehnende nicht exakt auf der Gleis-Sollgeometrie geführt wird, sondern Restfehler aufweist, die ins System zurückgekoppelt werden. Diese Fehler entstehen durch unregelmäßige Setzungen des Gleises nach dem Heben und durch Rückfedern des Gleises nach dem Richten, sowie durch die Rückkopplung dieser Fehler in den Regelkreis. Die entstehenden Setzungen hängen von der Schotterhöhe und dem Schotterzustand ab, das Rückfedern des Gleises von den Richtkräften, den Eigenschaften der Schienenbefestigung und dem Verhalten des Gleises selbst. Das endlos verschweißte Gleis weist bei hohen Schienentemperaturen (etwa ab $T > 20^{\circ}\text{C}$) eine Druckspannung und bei niedrigen Temperaturen (etwa ab $T < 20^{\circ}\text{C}$) eine Zugspannung auf. Nach dem Richten kann es auf Grund dieser inneren Spannungen zu einem Rück- oder Ausfedern des Gleises kommen. Ein anderer Grund ist die Übertragungsfunktion des Drei-Punkt-Systems, welches zu systematischen Fehlern führt, die allerdings mit bisherigen Methoden nicht kompensiert werden können. Bekannte Lösungen bilden nicht das

Gesamtverhalten der Maschine ab, sondern nur den indirekten Einfluss einzelner Gleisparameter (siehe EP3743561A1). Weitere Einflussgrößen auf das Ergebnis der Arbeit der Stopfmaschine sind das Regelverhalten des Hebe-Richt-Aggregates – die Hebung und Richtung muss vor Beendigung der Stopfung abgeschlossen sein, die Veränderung der Hebe-Richt-Korrekturen während des Arbeitsprozesses, die Wellenlängen der zu korrigierenden Gleisfehler, die Größe der Hebe- und Richtwerte (gemessen an den Aktoren der Hebe-Richt-Einrichtung), Ungenauigkeiten des Messsystems (mechanisch, elektronisch etc.) und der Stopfmodus. Bekannt ist das Stopfen mit Exzenterwellenstopfaggregaten und mit vollhydraulischen Stopfantrieben (EP2770108A1). Vollhydraulische Stopfaggregate messen die Schotterbetteigenschaften und regeln abhängig davon die Stopfparameter so, dass ein optimales Stopfergebnis erzielt wird (AT520117B1).

Auf dem Abnahmemessschrieb werden die zurückbleibenden Fehler aufgezeichnet. Geschieht dies mit einem inertial gestützten Navigationsmesssystem (beispielsweise EP3358079A1), sind die Fehler bis in den Wellenlängenbereich von mehr als 100m mit Genauigkeiten unter 1mm bekannt.

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 mit Testdatensätzen. In Abhängigkeit von der Zielsetzung der KI-Anwendung und der Beschaffenheit der zur Verfügung stehenden Daten werden überwachte (=supervised), unüberwachte (=unsupervised), bestärkende Lernverfahren (reinforcement learning), oder eine Kombination aus diesen Verfahren eingesetzt.

Heutige Stopfmaschinen sind durch umfangreiche Datenerfassung gekennzeichnet. Die erfassten Daten werden in eine Datenbank über Mobilfunk übertragen und auf einem Server gespeichert. Datenbank-Server verwalten die Daten zahlreicher Maschinen. Auf diese Art und Weise entsteht fortwährend ein immer größerer Datenbestand, der die Eingangsdaten einer Vielzahl von Stopfmaschinen in Verbindung mit den Ergebnissen der Gleisbearbeitung durch diese Maschinen abbildet.

Die mit der Zeit entstehende Menge und die Beschaffenheit dieser Daten erlaubt den Einsatz maschineller Lernverfahren, um statistische Modelle der Arbeitsweise von Stopfmaschinen zu erzeugen, die in weiterer Folge im Echtzeitbetrieb der Maschinen eingesetzt werden. Dabei werden folgende Strategien angewandt:

Unüberwachte Lernverfahren sind dadurch charakterisiert, dass durch menschliche Experten vorab interpretierte Daten als Trainingsdatensätze nicht zur Verfügung stehen. Algorithmen dieser Kategorie können autonom, ohne menschliches Zutun, in einer großen Datenmenge versteckte Muster und Assoziationen aufzeigen.

Eingangsdaten über die Stopfmaschine, den Stopfprozess und die Gleisinfrastruktur werden gruppiert und in Cluster unterteilt. Die resultierenden Cluster zeigen Zusammenhänge in den Daten auf, die für einen menschlichen Experten ob der großen Menge der Daten a priori kaum erkennbar sind. Eine Korrelationsanalyse stellt so den Einfluss spezifischer Eingangsparameter, wie z. B. Verdichtkraft und Beistellweg der Stopfaggregate, auf die Gleislagequalität fest. Generative KI-Systeme, wie beispielsweise Generative Adversarial Networks (GAN), transformieren diese Eingangsdaten iterativ, wodurch neue, korrigierte Abbilder der zu erwartenden Gleislage bzw. der jeweiligen Zielparameter nach Bearbeitung entstehen. Die Iteration wird bis zum Erreichen vordefinierter Kriterien, z.B. die Einhaltung von Restfehlerverlaufs-Obergrenzen, durchgeführt.

Beim Überwachten Lernen geht man von einer Datenbasis aus, die durch menschliche Experten bereits interpretiert wurde. Diese Daten werden zum Training eines Modells benutzt, das in einer zweiten Phase mit unbekannten Daten konfrontiert wird. Das System errechnet daraus eine Vorhersage für eine

Zielvariable, die entweder diskret (Klassifikation) oder numerisch (Regression) ist. Die Unterscheidung der Schotterbeschaffenheit (Härtekategorie, Schotterhöhe, Material) an einer gegebenen Gleisposition wird durch Klassifikation gelöst. Die Regressionsprognose liefert den zu erwartenden verbleibenden Gleisfehlern nach Bearbeitung mit einer Stopfmaschine.

Das bestärkende Lernen erfolgt auf Basis eines Bewertungssystems, das im Hinblick auf eine bestimmte Zielsetzung (z.B. der Einhaltung einer Gleislagenfehler-Obergrenze) günstiges Verhalten belohnt und ungünstiges Verhalten bestraft. Das System agiert autonom und versucht iterativ, durch Variationen des Verhaltens neue Lösungsstrategien zu entwickeln, um das Bewertungsergebnis zu maximieren. Das Verhalten des Systems entspricht den Zustandsübergängen zu definierten Zeitpunkten, woraus die einzelnen Bewertungen abgeleitet werden. Das System interagiert dabei mit einer Umwelt, die vorab bekannt oder unbekannt sein kann. Vorteil dieser Methode ist, dass sie ohne Beispieldaten funktioniert und unabhängig von der Stopfmaschine, z.B. im Labor simuliert werden kann. Diese Technik erlaubt es, den Stopfzyklus einer Maschine zu optimieren, diese im Umgang mit Hindernissen im Gleis zu unterstützen, sowie ein optimiertes An- und Abrampen bei gegebenen Gleislagen im Feld durchzuführen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde ein Verfahren anzugeben, welches die Gesamtwirkungsweise der Maschine abbildet, damit bei bekannten Korrekturwerten und Maschinenparametern, das Ergebnis der Stopfarbeit vorhergesagt werden kann. Die Erfindung soll ein abweichendes Verhalten der Gesamtmaschine von der Norm erkennen können, um so frühzeitig Wartungs- oder Reparaturmaßnahmen durchführen zu können. Ist diese Übertragungsfunktion der Gesamtmaschine bekannt, kann die Qualität der Arbeit beurteilt werden.

Die Erfindung löst die gestellte Aufgabe mit den Merkmalen der Ansprüche 1, 3 und 5. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung finden sich in den Unteransprüchen wieder.

Mittels künstlicher Intelligenzmethoden wird ein System mit bekannten Messdaten vergangener Arbeiten einer Maschine trainiert. Ziel des Trainings ist die Vorhersage des Ergebnisses der Gleislageberichtigung anhand vorgegebener Eingangsdaten.

Die Vorhersage des Korrekturergebnisses durch die Stopfmaschine bei bekannten Maschinen- und Gleisparametern gibt die Genauigkeit des Verfahrens an.

Erfindungsgemäß wird im Anschluss einer Stopfarbeit, das Ergebnis dahingehend beurteilt, ob es innerhalb des vorhergesagten Ergebnisses mit Unschärfen des trainierten KI-Programms liegt. Damit wird die Arbeitsweise der Maschine verfolgt und liefert Hinweise, wenn sich das Arbeitsergebnis der Maschine im Lauf der Zeit verschlechtert. Gründe sind beispielsweise: Fehlfunktionen oder Störungen an Hydraulikventilen, Störungen des Maschinenmesssystems, sich veränderndes Regelverhalten der Hebe-Richt-Aggregate etc. Damit ist ein Zustandsmonitoring der Gesamtmaschine hinsichtlich des Arbeitsverhaltens möglich. Schon eine Teststopfarbeit einer neuen Maschine, während der Inbetriebnahmephase erlaubt mit dem trainierten Modell die Überprüfung, ob die Maschinenarbeit und damit deren Steuerungs- und Regelmechanismen qualitativ entspricht. Damit ist eine Arbeitsvorbereitung durchzuführender Stopfarbeiten für ein optimales Ergebnis möglich.

In der Zeichnung ist der Erfindungsgegenstand beispielhaft schematisch dargestellt.

Es zeigen

- Fig. 1 Schematische Erklärung der Arbeitsweise des Dreipunkt-Verfahrens,
- Fig. 2 Übertragungsfunktion des Dreipunkt-Verfahrens,
- Fig. 3 Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen während der Trainingsphase eines unsupervised KI-Programms,
- Fig. 4 Eingangsgrößen und vorhergesagte Ausgangsgrößen eines trainierten unsupervised KI-Programms,
- Fig. 5 Diagramme Gleisfehler vor der Arbeit und vorhergesagter verbleibender Gleisfehler nach der Arbeit mit Fehlerbereich des KI-Programms
- Fig. 6 Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen während der Trainingsphase eines unsupervised KI-Programms für das Design Heben

- Fig. 7 Eingangsgrößen und vorhergesagte Ausgangsgrößen des trainierten unsupervised KI-Programms für das Design Heben nach Belastung
- Fig. 8 Diagramm Gleishöhenfehler, Hebewerte, Setzung unter Belastung und Überhebungswerte
- Fig. 9 Schematisches Histogramm der Restfehlerverteilung einer betrachteten Messgröße
- Fig. 10 Eingangsgrößen und Beurteilungsgrößen während der Trainingsphase eines supervised KI-Programms
- Fig. 11 Eingangsgrößen und vorhergesagte Beurteilungsgrößen nach der Trainingsphase eines supervised KI-Programms
- Fig. 12 ein konkretes Umsetzungsbesiepiel

Fig.1 zeigt schematisch stellvertretend für die Gleislageberichtigungsverfahren das Drei-Punkt-Verfahren. Mit schwarzer durchgehender Linie ist die Ist-Geometrie mit den Gleisfehlern dargestellt. Mit punktierter Linie ist die virtuelle ideale Sehne eingezeichnet. Diese ist zwischen einem Messwagen vorne und einem Messwagen hinten, beispielsweise über eine Stahlsehne aufgespannt. Hinten und vorne wird sie bei theoretisch exakter Gleisfehlerberichtigung auf der Soll-Geometrie geführt. Über einen Messwagen in der Mitte wird der Sollwert Mitte vorgegeben. Die Elektronik steuert das Hebe-Richt-Aggregat auf diesen Sollwert hin und berichtigt damit den Gleisfehler. Die reale Sehne liegt allerdings vorne auf dem fehlerhaften Ist-Gleis. Um diesen Fehler zu vermeiden, muss vor der Stopfarbeit die Abweichung der Ist-Lage zur Soll-Lage ermittelt werden. Die reale Sehne wird über die so ermittelten Korrekturwerte zur idealen Sehnenlage kompensiert. A und b kennzeichnen die Sehnenteilung, L die Länge der Sehne. S steht für die Bogenlänge in Gleislängsrichtung und Y für die (Höhen-) Abweichung des Gleises von $Y=0$.

Fig.2 stellt beispielhaft die Übertragungsfunktion des Drei-Punkt-Verfahrens dar. Die Gleisfehler werden abhängig von der Wellenlänge mit der Verstärkung v verstärkt (bzw. reduziert, wenn $v < 1$). Die X-Achse zeigt die Wellenlänge λ der Gleisfehler F_i und die vertikale Achse die Verstärkung. Die Form der Übertragungsfunktion hängt von der Sehnenteilung a , b und der Sehnenlänge L ab. Zusätzlich zum

Verstärkungsgang existiert auch ein Phasengang. Der dargestellten Übertragungsfunktion ist zu entnehmen, dass beispielsweise ein Fehler mit der Wellenlänge von 7m praktisch nicht beseitigt wird ($v=1$). Ein Fehler mit 30m Wellenlänge wird um 70% reduziert. Dies bedeutet, dass bei realen Fehlern, die ein Gemisch von Gleisfehlern der Wellenlängen von 3 bis 150m aufweisen Restfehler im Gleis zurückbleiben. Diese Gleisfehler treten an der Position des hinteren Sehnenendes auf und werden über die sich so ergebende Sehnenlage (siehe Bild 1) auf die Messstelle in der Mitte rückgekoppelt. Das bedeutet, das Berichtigungsverfahren kann theoretisch Gleisfehler nicht exakt beheben, es treten immer Restfehler abhängig von der Wellenlänge der Ursprungsfehler auf.

Für die Übertragungsfunktion $H(\lambda)$ des Drei-Punkt-Verfahrens gilt:

$$A = \frac{a}{a + b}$$

$$B = \frac{b}{a + b}$$

$$H(\lambda) = \frac{A \cdot e^{j2\pi \frac{x}{\lambda}}}{1 - B \cdot e^{-j2\pi \frac{x}{\lambda}}}$$

x ... Gleisdistanz (m)

λ ... Wellenlänge (m)

Die Verstärkung v ergibt sich zu $v(\lambda) = abs(H(\lambda))$. Abs bedeutet den Absolutwert einer komplexen Funktion.

Die Phasenverschiebung φ ergibt sich zu $\varphi(\lambda) = angle(H(\lambda))$. Angle bedeutet die Berechnung des Phasenwinkels der komplexen Funktion H .

Fig.3 zeigt schematisch, wie ein unsupervised KI-Programm trainiert wird.

Charakteristische Größen E_i , die das Ergebnis der Stopfmaschine beeinflussen bzw. beeinflussen könnten, werden in das KI-Programm eingespeist. Die Fehler vor der Arbeit (wie Höhenfehler-, Richtungsfehler- und Überhöhungsfehlerverlauf) werden meist durch einen unabhängigen Messvorgang gemessen. Sind die durchzuführenden Korrekturen zu hoch, werden diese durch den Verantwortlichen bearbeitet. Dies betrifft auch Anfangs- und Endrampe – denn das Gleis darf nicht

sprunghaft korrigiert werden. Über eine Rampe werden die Hebewerte und Richtwerte langsam aufgebaut. Aus dieser Bearbeitung folgen die geplanten Hebe- und Richtungskorrekturwerte. Auch der Stopfmodus, ob eine Gleisneulage vorliegt, oder eine Instandhaltungstopfung, beeinflusst das Stopfergebnis. Auch die Stopfzeit kann Einfluss nehmen. Wesentlich sind auch Kenngrößen der eingesetzten Hebe- Richtregler. Nur wenn die Hebe- Richtvorgänge vor dem Stopfende beendet sind, kann die Korrektur durch die Stopfung fixiert werden. Auch die Art des angewendeten Berichtigungsverfahrens hat Einfluss. Die Übertragungsfunktion ist wie schon oben gezeigt ebenfalls ein wichtiger Zusammenhang. Die realen Hebe- und Richtwerte, die die Aktoren am Hebe-Richt-Aggregat durchführen, weichen von den vorgegebenen Korrekturwerten ab. Während des Hebe-Richt-Vorgangs verändert sich nämlich die Gleislage und damit auch die Korrekturwerte für den nächsten Arbeitsschritt. Dazu kommen weitere charakteristische Eingangsparameter E_i , die das Stopfergebnis beeinflussen könnten (beispielsweise die Schotterbetthärte, die Verdichtkraft, etc.). Der unsupervised KI werden auch die Ergebnisse der einzelnen Baustellen als Verlauf der Höhen-, Richtungs- und Überhöhungsfehler eingespielt. Mit den Arbeitsergebnissen vieler Stopfeinsätze wird die KI trainiert. Sie lernt, welche Restfehlerverläufe F_i in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen entstehen.

Fig.4 zeigt schematisch die Funktion einer unsupervised KI nach dem Training. Wird das trainierte KI-Modell nun auf bekannte charakteristische Eingangsgrößen E_i , angewandt, liefert es eine Vorhersage des Ergebnisses FK_i . Dies hat die folgenden Vorteile und bietet die folgenden Möglichkeiten. Nach der Arbeit kann das Ergebnis mit der Vorhersage verglichen werden. Beispielsweise können die Differenzen als Standardabweichung errechnet werden. Funktioniert die Maschine gut, werden die Differenzen immer in einem bestimmten Vertrauensbereich zu liegen kommen. Wird dieser überschritten, kann daraus abgeleitet werden, dass die Funktionsfähigkeit der Maschine sich verschlechtert. Dies kann z. B. an einer Veränderung der Regelparameter liegen oder an einer Verschlechterung des Messsystems. Dies führt zur Notwendigkeit der Durchführung eines Maschinenservice oder eines generellen Checks der Maschine. Wird eine Maschine erstmalig in Betrieb

genommen, kann schon nach wenigen Probeeinsätzen die Qualität der Stopfmaschine beurteilt werden. Die KI auf eine konkrete Maschinentype trainiert werden.

Fig.5 zeigt erfindungsgemäß im obigen Diagramm den Gleisfehler F_i eines zu bearbeitenden Gleisabschnittes vor der Arbeit. Im Diagramm darunter wird die Vorhersage des Restfehlers FK_i der KI für diesen Gleisabschnitt (und die geplanten Eingangsgrößen) dargestellt. Die KI liefert dabei auch den Vertrauensbereich der Vorhersage als Toleranzband den $FTOLK_i$. Jede Veränderung eines Eingangsparameters führt zu einer Modifizierung der Vorhersage.

Fig.6 zeigt eine Möglichkeit ein unsupervised KI-Programm zu trainieren, wenn so genanntes Design Heben angewandt wird. Aus der Praxis und Untersuchungen ist bekannt, dass Hebungen von 15-20mm dazu führen, dass das Gleis unter Verkehrslast in seine alte Fehlerlage zurückkehrt. Der Grund liegt darin, dass praktisch die Schotterstruktur unter den Schwellen nicht wesentlich verändert wird. Erst bei größeren Hebungen werden neue Steine unter die Schwellen befördert, was dazu führt, dass es zu einer dauerhaften Beseitigung der Gleisfehler kommt. Beim Designheben wird nun abhängig vom Fehlerverlauf gezielt das Gleis überhoben. Unter den nachfolgenden Zuglasten setzt sich das Gleis entsprechend und strebt die gewollte fehlerarme Höhenlage an. Als Ausgangsgrößen FB_i dienen nun die sich einstellenden Restfehler nach Belastung, typischerweise nach 2 Millionen Tonnen Verkehrslast. Nach dieser Belastung hat sich der Großteil der Setzungen ausgebildet. Die Eingangsgröße Überhebungswerte ist charakteristisch dafür welche Hebungszuschläge verwendet werden. Diese können z.B. als prozentueller Zuschlag zu den geplanten Hebewerten berechnet werden.

Fig.7 zeigt erfindungsgemäß die Anwendung des trainierten KI-Programms. Die Vorhersage liefert nun Aussagen über die Restfehler nach Belastung FBK_i . Auch hier kann durch Optimierung der Überhebungswerte ein möglichst geringer Restfehler nach Gleisbelastung erreicht werden.

Das Fig.8 zeigt schematisch die Methode des Design Hebens. Normalerweise werden die Hebewerte H aus den Gleisfehlern F_i errechnet, indem man eine

Hebereferenz – die Gleis Nulllage einführt. Nach der Stopfarbeit liegt im Idealfall ein Gleis vor, welches zu einer Bezugslinie keine Abweichungen aufweist. Durch die Stopfung wird der Schotter nach der Hebung unter den Schwellen verdichtet, um diese Position zu fixieren. Da die Schottersteine nach der Stopfung nicht ihre dichteste Lage aufweisen, sondern durch die Verdichtkräfte gezwungen gelagert werden, treten unter den Zugfahrten Lagerungsveränderungen auf. Durch die dichtere Lagerung kommt es zu Setzungen, die von Hebewerten abhängig sind. Es kommt daher zu unregelmäßigen Setzungen S – Gleisfehler stellen sich wieder ein. Durch das Design Heben wird diese zu erwartende Setzung S theoretisch eingerechnet. Im Idealfall nimmt das Gleis theoretisch nach hinreichender Belastung die ideale Gleis Nulllage an.

Fig.9 zeigt schematisch ein Histogramm (Häufigkeit FR) der Restfehler F_i (Höhe, Richtung, Überhöhung). Üblicherweise wird die Standardabweichung der Restfehler von 200m Gleisabschnitten berechnet. Je hochwertiger die Gleisgeometrie, um so geringer die Standardabweichungen. Die Messergebnisse von Arbeiten gleicher Maschinen wird in Datenbanken gespeichert. Erfahrungsgemäß können diese Verteilungen durch Log-Normal Verteilungen dargestellt werden. Man kann nun diese Restfehlerverteilung in Klassen ($K1 - K10$) gleicher Summenhäufigkeit einteilen. Die niedrigste Klasse $K1$ entspricht den besten Gleisgeometrien und die höchste Klasse $K10$ den schlechtesten. Mit Hilfe dieser Klassifizierung kann ein bestimmtes Ergebnis nach einer Stopfarbeit objektiv beurteilt werden in dem es einer bestimmten Klasse als zugehörig eingestuft wird.

Fig.10 zeigt ein supervised KI-Programm. Im Gegensatz zu unsupervised KI-Programmen muss diesem Programm eine Ergebnisbeurteilung FKL_i während des Lernens zugeführt werden. Jeder Datensatz, der während des Trainings gelernt wird, muss daher vorab mit einer Beurteilung versehen sein. Dies kann durch die Angabe der Qualitätsklasse ($K1 - K10$) der Restfehler F_i (Beurteilungsgrößen) des betrachteten Abschnitts erfolgen.

Fig.11 zeigt schematisch die Anwendung des trainierten supervised KI-Programms. Werden diesem die Eingangsparameter E_i eines zu beurteilenden Gleisabschnittes

zugeführt, liefert dieses die Vorhersage der Zuordnung der Restfehler zu einer Qualitätsklasse FKLKi. Auch das supervised KI-Programm erlaubt nun die Anwendung von Optimierungsverfahren durch Anpassung der Eingangsgrößen E_i vor Beginn der Stopfarbeit, um ein möglichst gutes Ergebnis zu erhalten. Weichen die Ergebnisse der Stopfmaschine von den Vorhersagen ab, kann auch hier auf Fehlfunktionen geschlossen und ein Service oder Check der Maschine erfolgen.

Fig.12 zeigt ein mögliches Ausführungsbeispiel eines unsupervised KI-Programms. Das Beispiel basiert auf dem normalisierten Höhenfehler eines bekannten Gleisabschnitts als Eingangssignal, bezeichnet als „Vor der Arbeit“ 1. Das Eingangssignal ist eine Überlagerung einer nicht bekannten Anzahl von periodischen Gleisfehler-Wellensignalen, die jeweils einen Gleishöhenfehler mit einer charakteristischen Wellenlänge (z.B. $\lambda = 20\text{m}$) darstellen.

Das Encoder-Netz 2 analysiert das Eingangssignal und unterteilt es in Signalbestandteile, gewichtet nach deren Relevanz für das Gesamtsignal 3. Auf dem Eingangssignal-Abschnitt dominante Wellenlängen (z.B. $\lambda = 15\text{m}$) erhalten eine höhere Gewichtung als Wellenlängen mit einem geringen Beitrag (z.B. $\lambda = 120\text{m}$). Das durch mehrere Schichten des Netzes encodierte Signal wird einerseits direkt an ein Decoder-Netz 4 und parallel dazu an ein weiteres, tiefes neuronales Netz (Deep Neural Network - DNN) 6 weitergeleitet.

Das Decoder-Netz 4 setzt die einzelnen Signalbestandteile nach deren Gewichtung wieder zusammen und errechnet ein Ausgabesignal. In Schritt 5 wird eine Ausgabe „vor der Arbeit“ generiert, die dem Eingangssignal „vor der Arbeit“ so gut als möglich entsprechen soll. Je größer diese Ausgabe von der ursprünglichen Eingabe abweicht, umso schlechter funktioniert die Encoder-Decoder-Pipeline 3. Dieser Vergleich wird durch eine Kostenfunktion bzw. Bewertungsfunktion abgebildet, die die Differenzen zwischen dem Eingangssignal „vor der Arbeit“ und dem Ausgangssignal „vor der Arbeit“ bildet. Mithilfe dieser Kostenfunktion und der vorab nicht bewerteten Trainingsdaten werden Encoder- und Decoder-Netz trainiert (unüberwachtes Lernen). Die Qualität des Gesamtsystems hängt dabei sehr stark von der Größe des zur Verfügung stehenden Trainingsdatensatzes ab.

Um eine Prognose des zu erwartenden Höhenfehlers für den gewählten Gleisabschnitt „nach der Arbeit“ zu erhalten, wird das Signal durch das DNN 6 transformiert, bevor es dem Decoder-Netz übergeben wird. In Schritt 7 entsteht eine abgewandelte Repräsentation der Daten, die in Folge an das Decoder-Netz 4 übergeben werden. Das Decoder-Netz errechnet die Prognose des Höhenfehlers „nach der Arbeit“ als Ausgangssignal 8.

Auch das DNN 6 muss explizit trainiert werden. Der Trainingsdatensatz besteht neben dem Höhenfehler „vor der Arbeit“ noch aus den aufgezeichneten Ergebnissen, also den Resthöhenfehlern „nach der Arbeit“. Diese Resthöhenfehler repräsentieren das „Expertenwissen“, auf Basis dessen das DNN trainiert werden kann (überwachtes Lernen). Aus den gesamten zur Verfügung stehenden Trainingsdatensätzen wird ein Teil (5%-10%) ausgespart, der zur Validierung des DNN verwendet wird und somit die Qualität der Prognose widerspiegelt.

Wendet man das System in der Praxis an, so kann man bei gegebener Höhenfehlerlage eines Gleisabschnitts das zu erwartende Ergebnis der Bearbeitung durch eine Stopfmaschine vorab errechnen. Die Diskrepanz des Ergebnisses der Bearbeitung zum prognostizierten Ergebnis gibt Aufschluss über sich abzeichnende Probleme der Stopfmaschine.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung voraussichtlicher Restfehler einer mit mindestens einer gleisfahrbaren Gleisstopfmaschine zu korrigierenden Lage eines Gleises nach erfolgter Korrektur, wobei die Hebe- Richtaggregate und Stopfaggregate aufweisende Gleisstopfmaschine nach einem Gleislageberichtigungsverfahren arbeitet und Stopfeinsätzen zugeordnete Eingangsgrößen (E_i) sowie Ausgangsgrößen (F_i) in einer Datenbank speichert, wobei zunächst ein unsupervised Künstliche Intelligenz Programm (US-KI) einer Gleisstopfmaschine mit gespeicherten Eingangsgrößen (E_i) und gespeicherten Ausgangsgrößen (F_i) vorangegangener Stopfeinsätze trainiert wird, wonach in das trainierte unsupervised Künstliche Intelligenz Programm (US-KI-T) vor der Durchführung einer Stopfarbeit, Gleislageparametern eines zu korrigierenden Gleises eingelesen werden und das unsupervised Künstliche Intelligenz Programm (US-KI-T) vor der Durchführung einer Stopfarbeit die nach Durchführung der Stopfarbeit vorliegenden Restfehler (FK_i) vorherberechnet.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das unsupervised Künstliche Intelligenz Programm (US-KI-T) einen Vertrauensbereich der Vorhersage der Restfehler (FK_i) als Toleranzband ($FTOLK_i$) bestimmt, wobei die Breite des Toleranzbandes ($FTOLK_i$) als Qualitätsmaß für die Arbeitsgenauigkeit und den Verschleiß der Stopfmaschine dient.
3. Verfahren zur Ermittlung voraussichtlicher Restfehler einer mit mindestens einer gleisfahrbaren Gleisstopfmaschine zu korrigierenden Lage eines Gleises nach erfolgter Korrektur, wobei die Hebe- Richtaggregate und Stopfaggregate aufweisende Gleisstopfmaschine nach einem Gleislageberichtigungsverfahren arbeitet und Stopfeinsätzen zugeordnete Eingangsgrößen (E_i) sowie

Ausgangsgrößen (F_i) in einer Datenbank speichert, wobei zunächst ein supervised Künstliche Intelligenz Programm (S-KI) einer Gleisstopfmaschine mit gespeicherten Eingangsgrößen (E_i) und gespeicherten klassifizierten Beurteilungsgrößen (FKL_i) vorangegangener Stopfeinsätze trainiert wird, wonach in das trainierte supervised Künstliche Intelligenz Programm (S-KI-T) vor der Durchführung einer Stopfarbeit, Gleislageparametern eines zu korrigierenden Gleises eingelesen werden und das supervised Künstliche Intelligenz Programm (S-KI-T) vor der Durchführung einer Stopfarbeit die nach Durchführung der Stopfarbeit vorliegenden Beurteilungsgrößen (FKL_i) vorherberechnet.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass das supervised Künstliche Intelligenz Programm (S-KI-T) einen Vertrauensbereich der Vorhersage der Beurteilungsgrößen (FKL_i) bestimmt, wobei die Breite des Vertrauensbereiches als Qualitätsmaß für die Arbeitsgenauigkeit und den Verschleiß der Stopfmaschine dient.

5. Verfahren zur Ermittlung voraussichtlicher Restfehler einer mit mindestens einer gleisfahrbaren Gleisstopfmaschine zu korrigierenden Lage eines Gleises nach erfolgter Korrektur, wobei die Hebe- Richtaggregate und Stopfaggregate aufweisende Gleisstopfmaschine nach einem Gleislageberichtigungsverfahren arbeitet und Stopfeinsätzen zugeordnete Eingangsgrößen (E_i) sowie Ausgangsgrößen (FB_i) belastet durch Zugverkehr nach Stopfeinsätzen in einer Datenbank speichert, wobei zunächst ein unsupervised Künstliche Intelligenz Programm (US-KI-DH) einer Gleisstopfmaschine mit gespeicherten Eingangsgrößen (E_i) und gespeicherten belasteten Ausgangsgrößen (FB_i) vorangegangener Stopfeinsätze trainiert wird, wonach in das trainierte unsupervised Künstliche Intelligenz Programm (US-KI-DH-T) vor der Durchführung einer Stopfarbeit, Gleislageparametern eines zu korrigierenden Gleises eingelesen werden und das unsupervised Künstliche Intelligenz Programm (US-KI-DH-T) vor der Durchführung einer Stopfarbeit die nach Durchführung der Stopfarbeit vorliegenden belasteten Restfehler (FBK_i) vorherberechnet.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass das unsupervised Künstliche Intelligenz Programm (US-KI-DH-T) einen Vertrauensbereich der Vorhersage der Restfehler (FBK_i) als Toleranzband ($FTOLK_i$) bestimmt, wobei die Breite des Toleranzbandes ($FTOLK_i$) als Qualitätsmaß für die Arbeitsgenauigkeit und den Verschleiß der Stopfmaschine dient.

Fig. 1

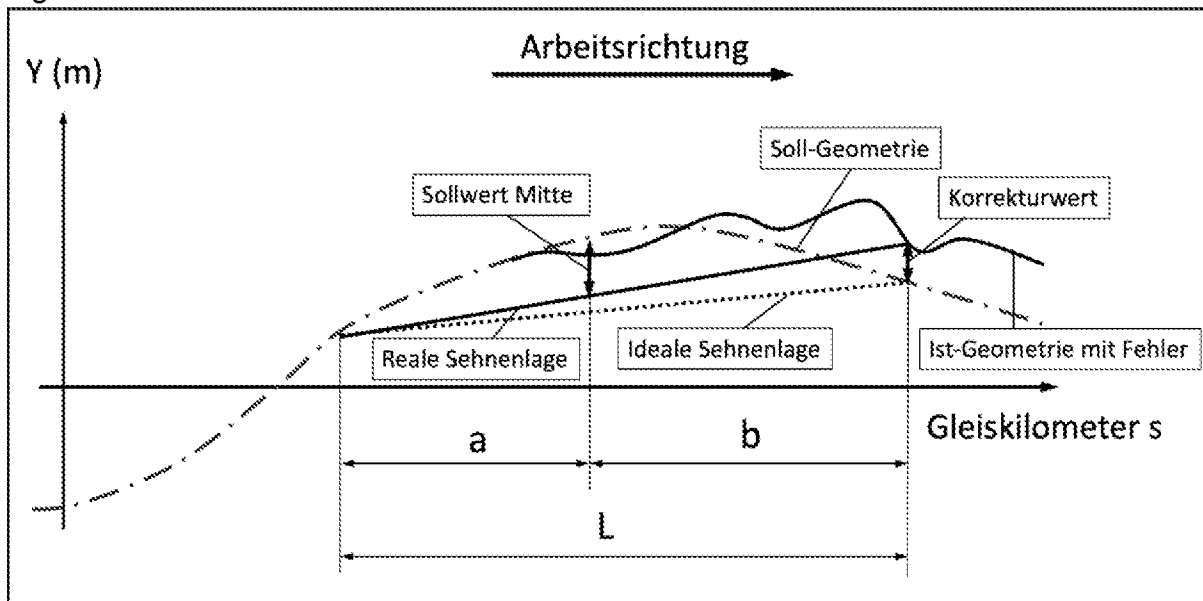


Fig. 2

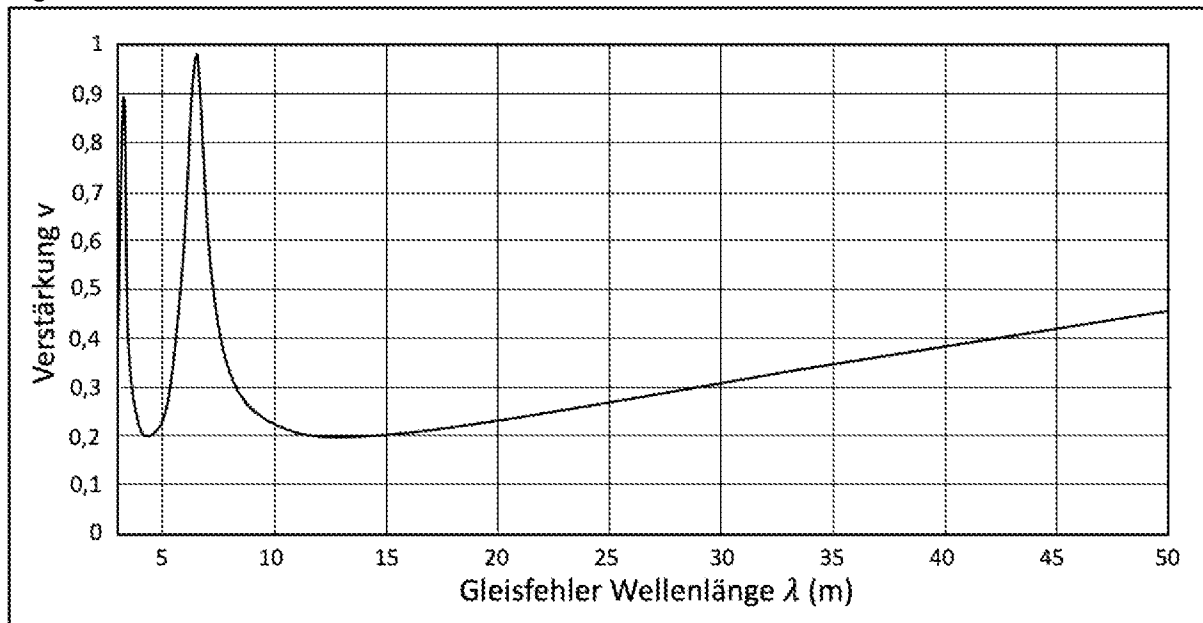


Fig. 3

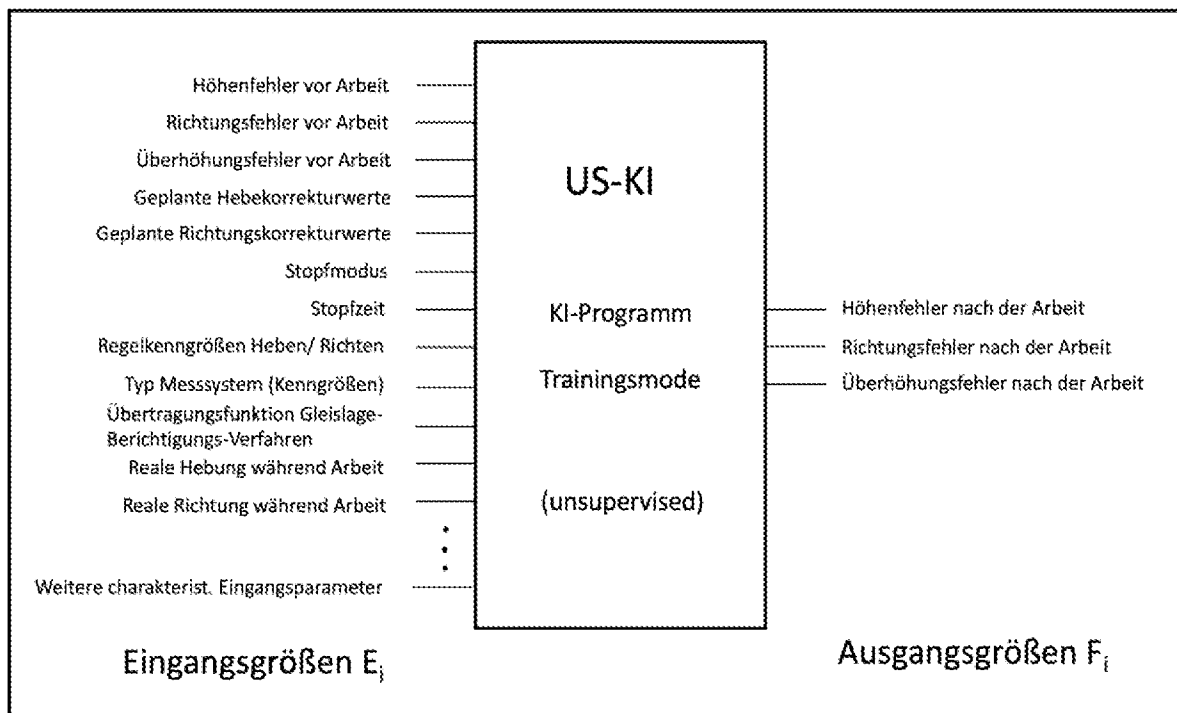


Fig. 4

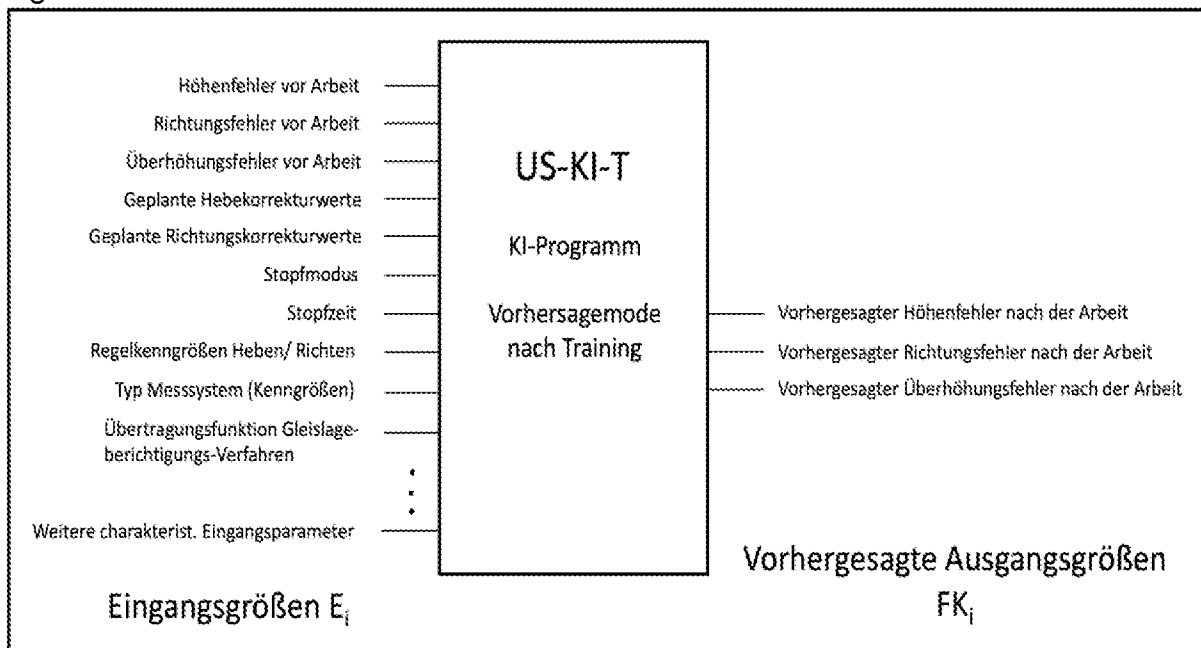


Fig. 5

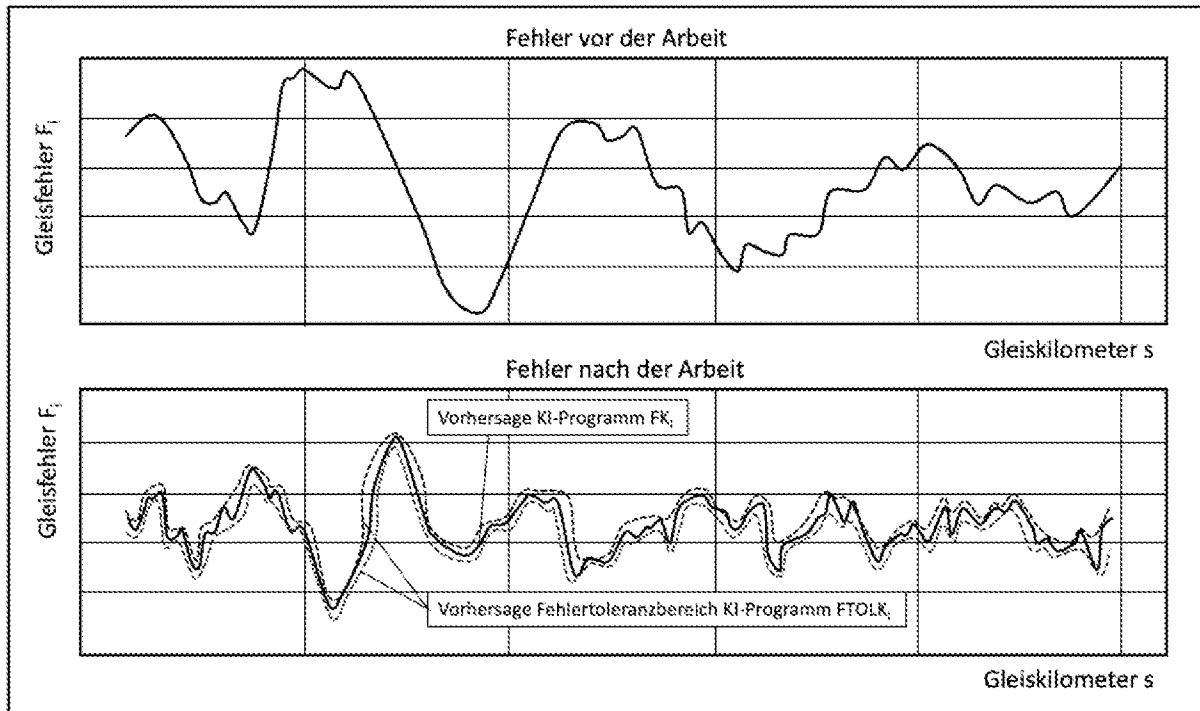


Fig. 6

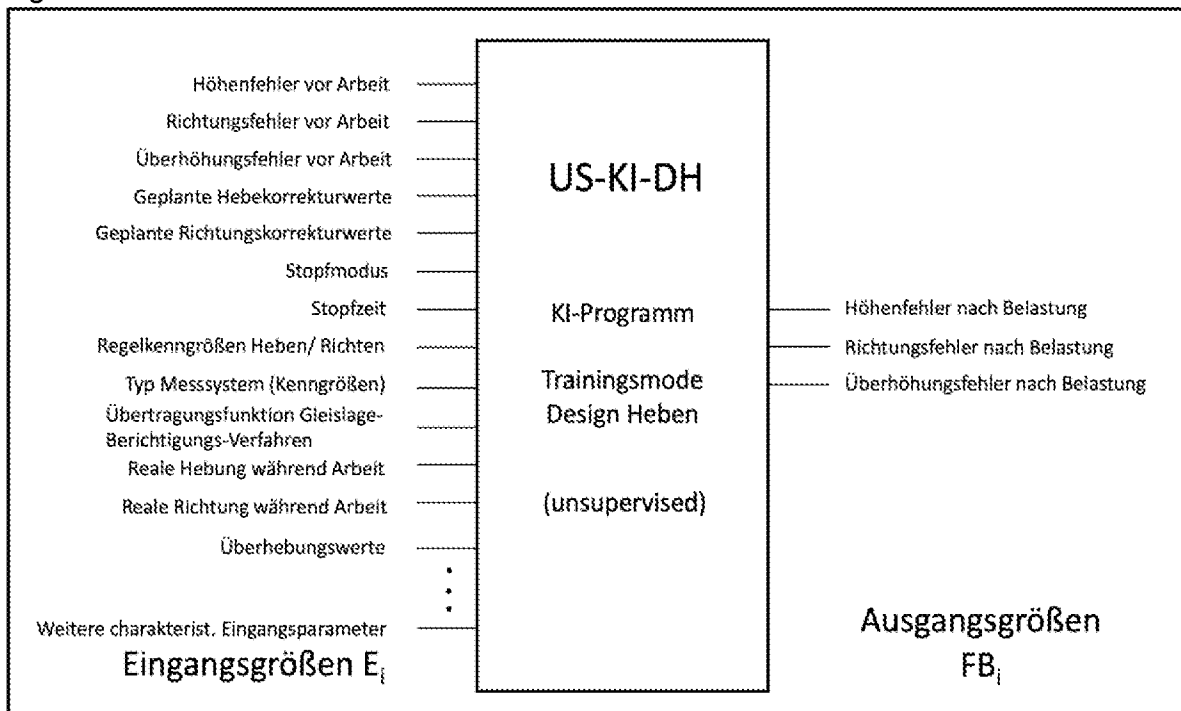


Fig. 7

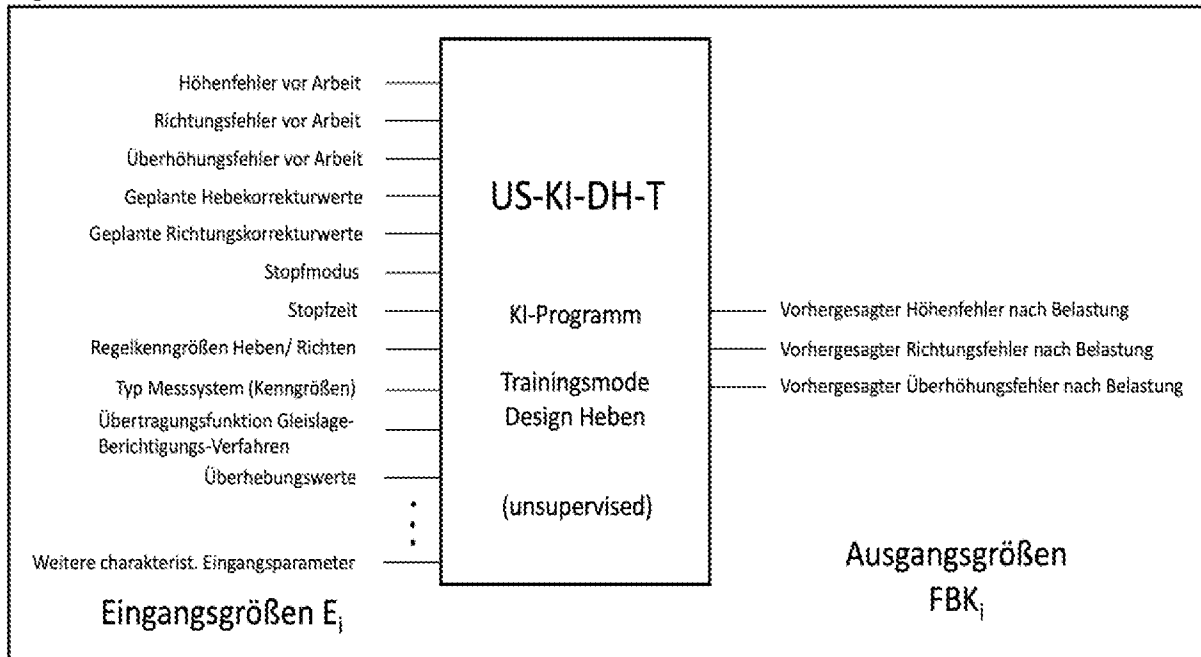


Fig. 8

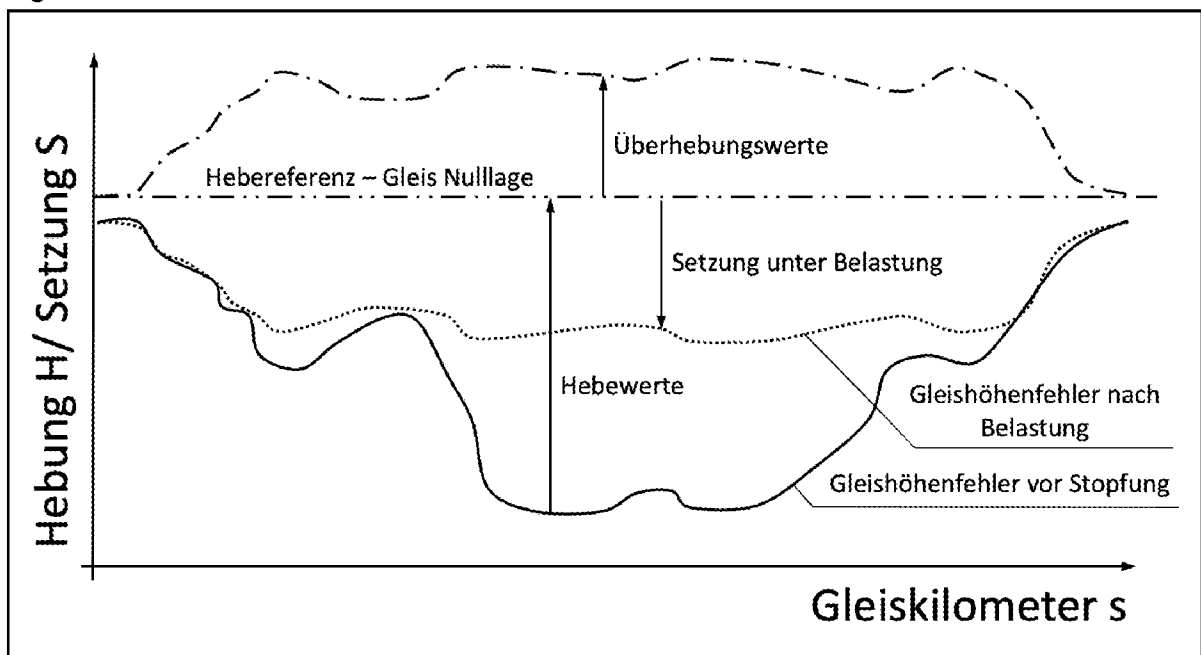


Fig. 9

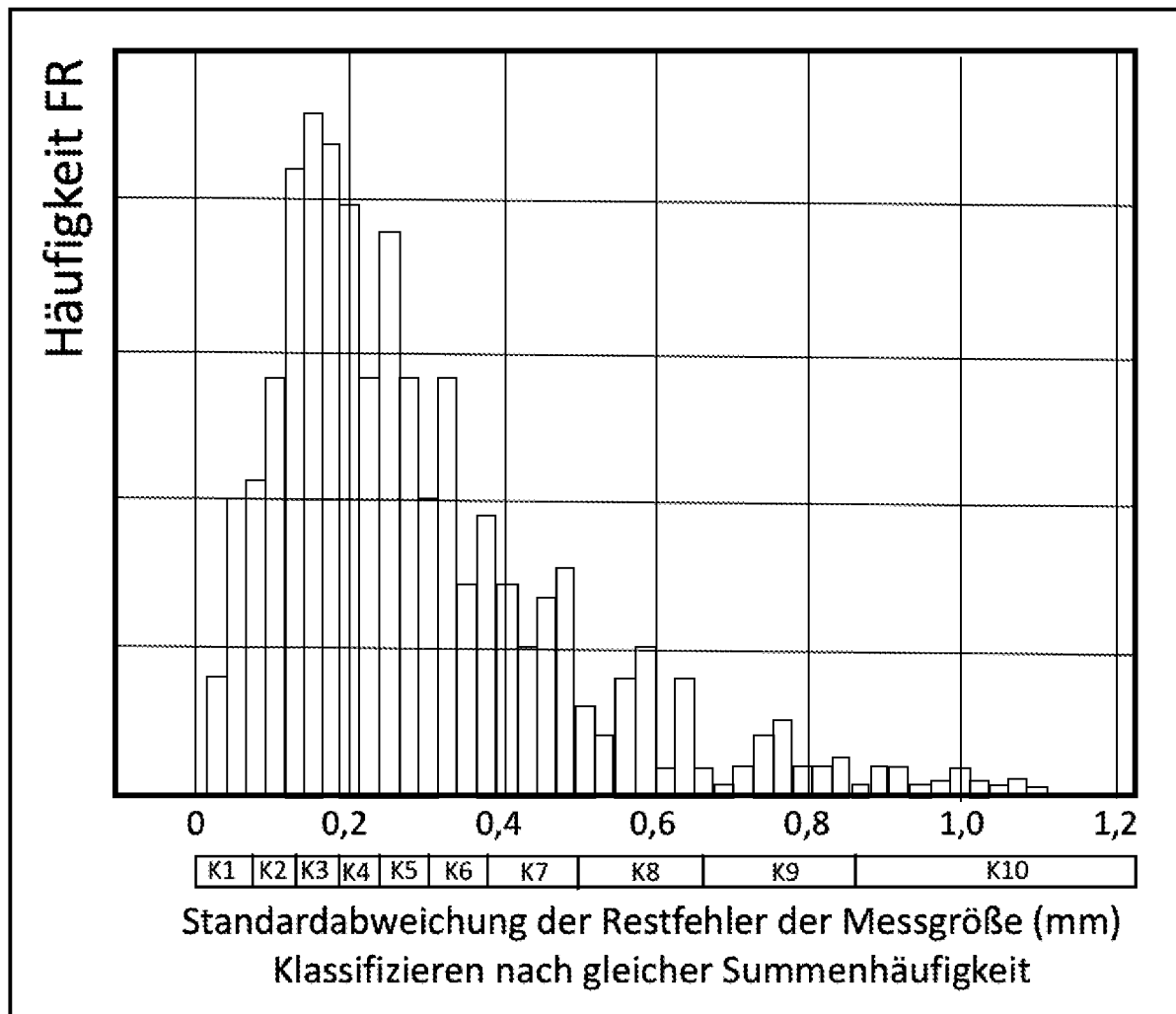


Fig. 10

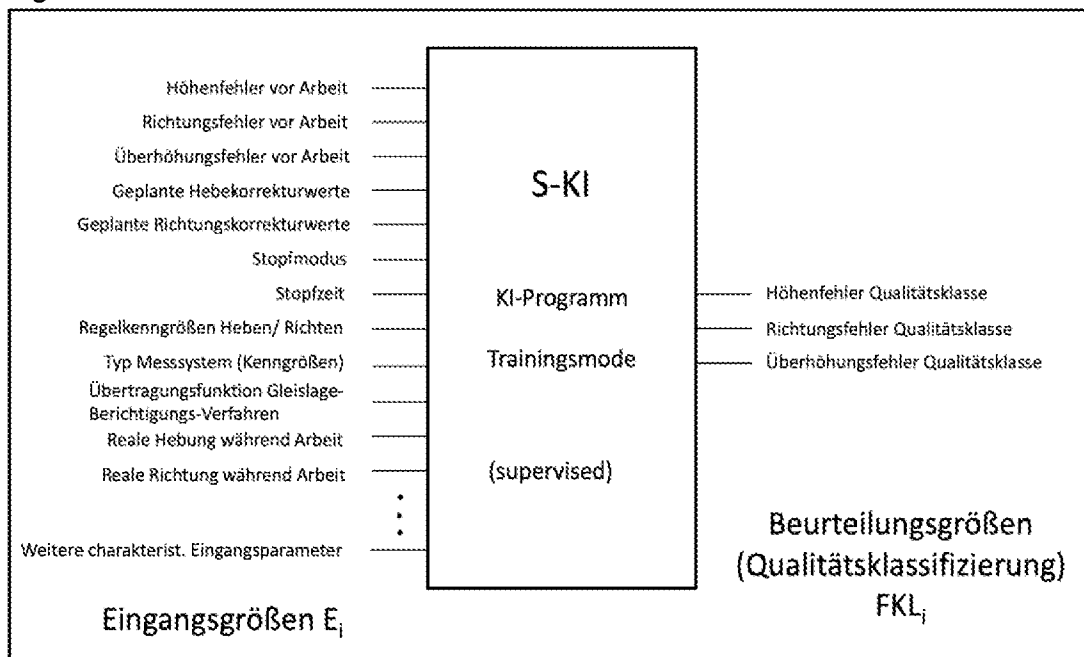


Fig. 11

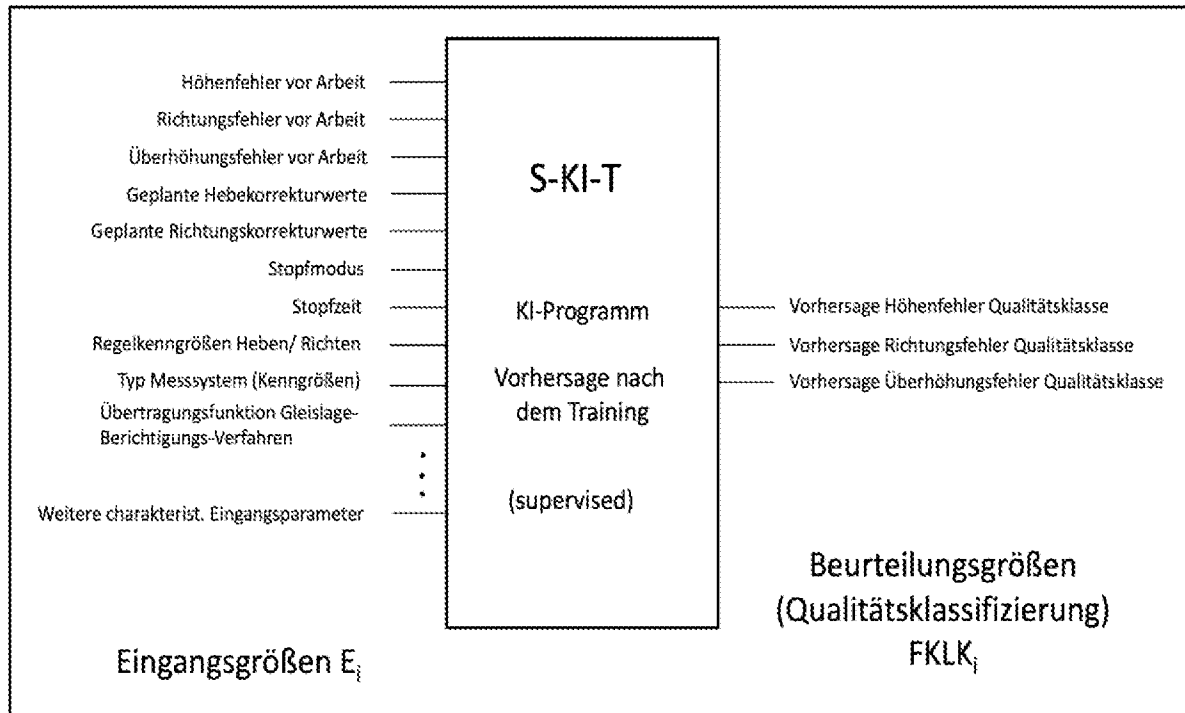
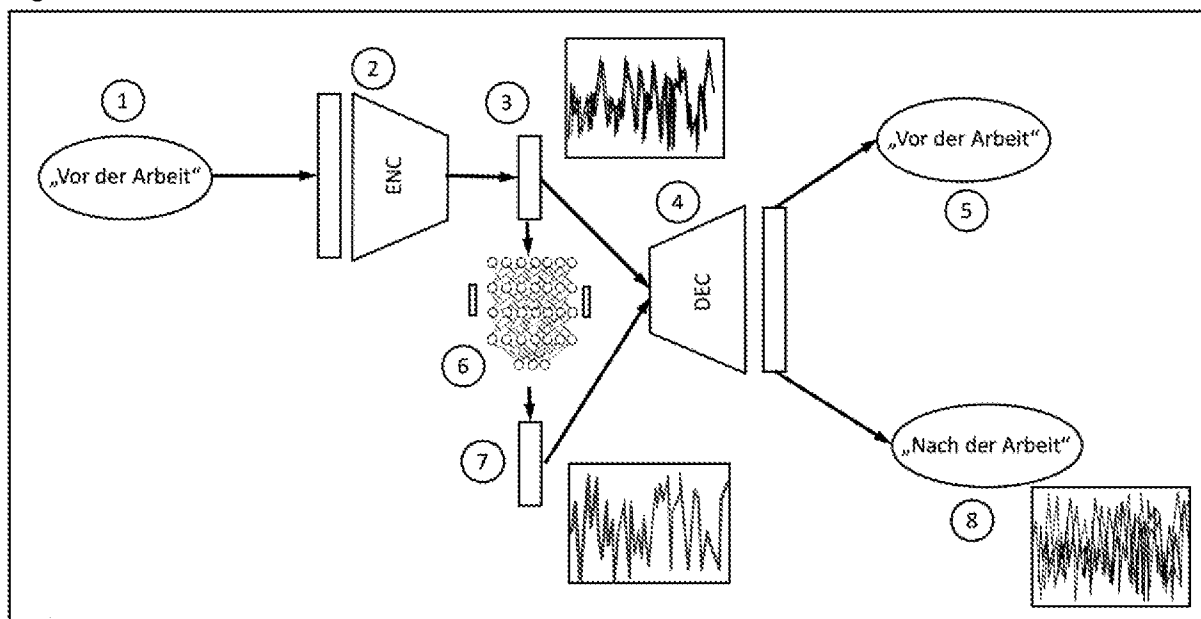


Fig. 12



Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß IPC:
E01B 35/00 (2006.01); **E01B 27/17** (2006.01); **E01B 29/04** (2006.01)

Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß CPC:
E01B 35/00 (2013.01); **E01B 27/17** (2017.05); **E01B 29/04** (2013.01)

Recherchierter Prüfstoff (Klassifikation):
E01B

Konsultierte Online-Datenbank:
EPODOC; WPIAP; TXTnn

Dieser Recherchenbericht wurde zu den am 28.08.2023 eingereichten Ansprüchen 1-6 erstellt.

Kategorie ^{*)}	Bezeichnung der Veröffentlichung: Ländercode, Veröffentlichungsnummer, Dokumentart (Anmelder), Veröffentlichungsdatum, Textstelle oder Figur soweit erforderlich	Betreffend Anspruch
A	EP 4134485 A1 (HP3 REAL) 15. Februar 2023 (15.02.2023) gesamtes Dokument	1-6
A	WO 2018082798 A1 (PLASSER & THEURER) 11. Mai 2018 (11.05.2018) gesamtes Dokument	1-6
Datum der Beendigung der Recherche: 12.07.2024 Seite 1 von 1 Prüfer(in): STAWA Richard		

^{*)} Kategorien der angeführten Dokumente:

- X** Veröffentlichung **von besonderer Bedeutung**: der Anmeldungsgegenstand kann allein aufgrund dieser Druckschrift nicht als neu bzw. auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden.
- Y** Veröffentlichung **von Bedeutung**: der Anmeldungsgegenstand kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren weiteren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese **Verbindung für einen Fachmann naheliegend** ist.

- A** Veröffentlichung, die den allgemeinen **Stand der Technik** definiert.
- P** Dokument, das von **Bedeutung** ist (Kategorien X oder Y), jedoch **nach dem Prioritätstag** der Anmeldung veröffentlicht wurde.
- E** Dokument, das **von besonderer Bedeutung** ist (Kategorie X), aus dem ein „**älteres Recht**“ hervorgehen könnte (früheres Anmeldedatum, jedoch nachveröffentlicht, Schutz ist in Österreich möglich, würde Neuheit in Frage stellen).
- &** Veröffentlichung, die Mitglied der selben **Patentfamilie** ist.