



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
27.02.2019 Patentblatt 2019/09

(51) Int Cl.:
E01B 19/00^(2006.01) E01B 2/00^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **17187153.6**

(22) Anmeldetag: **21.08.2017**

(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 MD

(72) Erfinder:
• **MÜLLER, Roger**
3047 Bremgarten (CH)
• **HAFNER, Michael**
4632 Trimbach (CH)

(74) Vertreter: **Rutz & Partner**
Alpenstrasse 14
Postfach 7627
6304 Zug (CH)

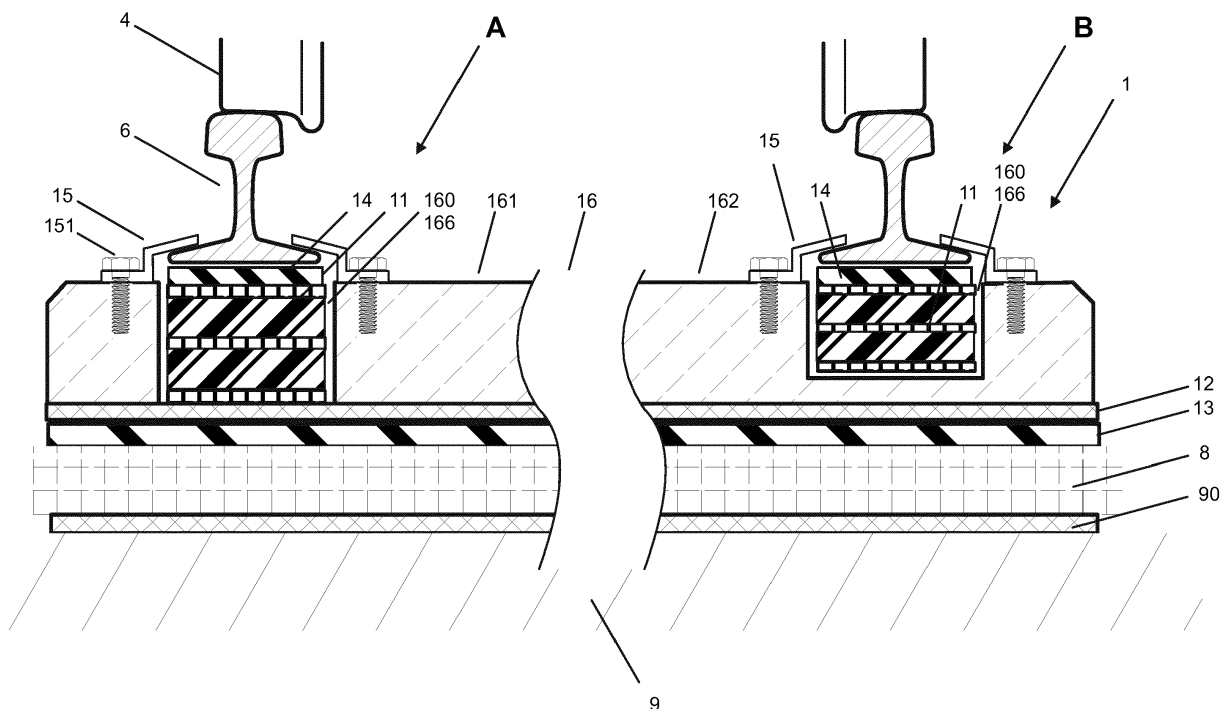
(71) Anmelder: **Schweizerische Bundesbahnen SBB**
3000 Bern (CH)

(54) **LAGERVORRICHTUNG FÜR EISENBAHNSCHIENEN**

(57) Die Lagervorrichtung (1) dient dem Halten wenigstens einer Eisenbahnschiene (6), die auf einem elastischen Element (11) ruht, das an einer Abstützvorrichtung (12) anliegt, die durch eine metallene Basisplatte (12) und/oder durch eine Schwelle gebildet wird. Das elastische Element (11) ist eine erste makroskopische

kristalline Federstruktur (11), die mit ihrer Längsachse (y) senkrecht zur Eisenbahnschiene (6) ausgerichtet ist und die eine periodische dreidimensionale Kristallstruktur aufweist, die mechanische Schwingungen in einem ersten Frequenzbereich von vorzugsweise 1 Hz - 200 Hz zumindest teilweise absorbiert und/oder reflektiert.

Fig. 3



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Lager-
vorrichtung für Eisenbahnschienen.

[0002] Gemäss [1], Klaus Lieberenz et. al., Dyna-
mische Stabilität der Fahrbahn, Edition ETR 2005, erfolgt
5 durch Anhebung der Betriebsgeschwindigkeit eine Erhö-
hung der Beanspruchung der Fahrbahn und des Unter-
baus. Dabei treten statische bzw. quasistatische und
auch dynamische Lasteintragungen auf, die für Belas-
tungen und Emissionen besonders relevant sind. Es wurde
10 festgestellt, dass in Abhängigkeit von der Geschwindig-
keit sowie typischer Abstände im Fahrzeug-Fahrweg-
System - wie Drehgestell- und Achsabstände, aber auch
durch Radunrundheiten und Schienenriffel-periodisch
wiederkehrende Lasteintragungen in unterschiedlichen
15 Frequenzbereichen erfolgen, die zu erhöhten Belastun-
gen führen. Anhand von Modellrechnungen wurde nach-
gewiesen, dass elastische Elemente, wie Zwischenlag-
en, Schwellensolehlen und Unterschottermatten im
Oberbau zur Reduktion dieser Belastungen beitragen
20 können.

[0003] Die [2], DE102013209495A1 beschreibt eine
Schwellensolehle, die aus einem hochpolymeren elasti-
schen Material besteht und die zur direkten Anbindung
an eine Spannbetonschwelle aus frischem, ungebunden-
25 en Beton vorgesehen ist, zum Zweck der Schotterscho-
nung, sowie zur Schwingungs- und Schallentkopplung
beim Gleisbau für den Schienenverkehr.

[0004] Zu beachten ist, dass das gesamte Schienen-
system ein Schwingungssystem bildet, welches im We-
sentlichen aus dem Radsatz mit schwingungsfähiger un-
abgefederter Radsatzmasse, der Schiene, der Schie-
nenzwischenlage, der Schwelle mit allfälliger Besohlung,
30 Schotter und Unterbau (z.B. Erdreich, Betonplatte, Tun-
nelsolehle, etc.) besteht. Die obere Kopplungsebene wird
durch die Schienen und die untere Kopplungsebene
durch das Fundament und das Erdreich gebildet.
Schwingungen können in der oberen Kopplungsebene
über die Eisenbahnschienen und in der unteren Kopp-
40 lungsebene durch das Fundament und Erdreich von
Schwelle zu Schwelle gelangen. Durch die Einwirkungen
der Räder eines Schienenfahrzeugs auf die Schienen
werden mechanische Schwingungen über die Schwellen
in den Schotter und den Unterbau (z.B. Erdreich) einge-
koppelt. Durch die Erschütterungen der Schwellen und
45 des Erdreichs resultieren einerseits Belastungen und
möglicherweise Beschädigungen des Gleisober- und
Gleisunterbaus (nachfolgend Schienensystem) und an-
dererseits akustische und dynamische Beeinträchtigen-
50 gen im Nahbereich der Eisenbahnschienen, z.B. in na-
heliegenden Gebäuden.

[0005] Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Auf-
gabe zugrunde, eine verbesserte Lagervorrichtung für
Eisenbahnschienen zu schaffen.

[0006] Insbesondere ist eine Lagervorrichtung zu
schaffen, mit der einerseits die Belastungen des Schie-
nensystems und andererseits störende akustische Ein-

wirkungen auf den Nahbereich der Eisenbahnschienen
wesentlich reduziert werden können.

[0007] Der normale Oberbau, aber auch spezielle
Störstellen im Eisenbahnnetz, wie Weichen, Isolierstö-
5 se, eine zu geringe Schotterdicke, Übergänge, Brücken,
Tunnel, etc., sollen bezüglich schädlichen Schwingun-
gen, Vibrationen und Erschütterungen verbessert wer-
den. Schotter und Unterbau in verkehrstechnisch hoch-
belasteten Strecken, bei denen Wartungseinsätze nur
10 noch beschränkt möglich sind, sollen durch Einsatz der
verbesserten Lagervorrichtungen eine höhere Lebens-
dauer erhalten.

[0008] Erfindungsgemässe Lagervorrichtungen sollen
in allen erforderlichen Ausgestaltungen realisierbar sein
und uneingeschränkt, z.B. auf offenen Strecken und
15 Kunstbauten oder in Tunnels vorteilhaft eingesetzt wer-
den können.

[0009] Diese Aufgabe wird mit einer Lagervorrichtung
gelöst, welche die in Anspruch 1 angegebenen Merkmale
20 aufweist. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung
sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

[0010] Die Lagervorrichtung dient dem Halten wenig-
stens einer Eisenbahnschiene, die auf einem elastischen
Element ruht, das an einer Abstützvorrichtung anliegt.

[0011] Erfindungsgemäss ist das elastische Element
25 eine erste makroskopische kristalline Federstruktur, die
mit ihrer Längsachse bzw. Dehnungsachse senkrecht
zur Eisenbahnschiene und vorzugsweise senkrecht zu
den Radachsen der Schienenfahrzeuge ausgerichtet ist
und die eine vorzugsweise periodische dreidimensionale
30 Kristallstruktur aufweist, die mechanische Schwingun-
gen in einem ersten Frequenzbereich von vorzugsweise
1 Hz - 200 Hz zumindest teilweise absorbiert und/oder
reflektiert.

[0012] Die erste kristalline Federstruktur weist eine
Kristallstruktur mit einem dreidimensionalen Kristallgitter
oder Punktgitter auf, mit Abständen der Gitterpunkte,
35 die um ein Vielfaches vergrössert sind und im Bereich von
einigen Zentimetern bis zu wenigen Dezimeter liegen.

[0013] Vorzugsweise werden dreidimensionale Kri-
stallstrukturen mit einer Gitterstruktur verwendet, die dem
sogenannten Bravais-Gitter entsprechen. Dabei können
40 Gitterstrukturen mit rechtwinkligen (orthogonalen) Ach-
sensystemen, wie kubische Kristallsysteme, tetragonale
Kristallsysteme, orthorombische Kristallsysteme, oder
Gitterstrukturen mit schiefwinkligen Achsensystemen,
wie hexagonale Kristallsysteme, trigonale Kristallsyste-
45 me, z.B. rhomboedrische Kristallsysteme, trikline Kri-
stallsysteme, zylindrische Kristallsysteme eingesetzt wer-
den.

[0014] Die verwendeten kristallinen Federstrukturen
können dabei die Kristallstruktur eines metallenen oder
nicht-metallenen Elements oder eines Halbleiters auf-
weisen. In [3], Gorishnyy et. al., Sound ideas, Physics
50 World, Dezember 2005, wird festgestellt, dass sogenan-
nte phononische Kristalle neue Komponenten offerieren,
mittels denen Schall ebenso kontrolliert werden kann,
wie Licht mittels Spiegeln, Linsen oder photonischen Li-

chtwellenleitern.

[0015] Die elastischen Eigenschaften von Kristallen können für geringe Auslenkungen mit Hilfe des verallgemeinerten Hooke'schen Gesetzes dargestellt werden, d.h. durch eine lineare Beziehung zwischen Spannung und Formänderung.

[0016] In [4], Delpero et. al., Structural engineering of three-dimensional phononic crystals, Journal of Sound and Vibration, November 2015, wird festgestellt, dass anhand makroskopischer Strukturen neue Dämpfungslösungen in konventionellen technischen Bereichen, wie der Mechanik, erzielt werden können.

[0017] Erfindungsgemässe kristalline Federstrukturen sind phononischen Kristallstrukturen nachgebildet und derart dimensioniert und ausgebildet, dass störende Schwingungen, die im Schienensystem auftreten, gedämpft oder absorbiert oder reflektiert werden können.

[0018] Für erfindungsgemässe Lagervorrichtungen können die Spektren von Schwingungen und Vibrationen, die in einem Schienensystem auftreten, aufgenommen und die Dämpfungskurven oder Filterkurven des Dämpfungssystems der erfindungsgemässen Lagervorrichtungen entsprechend angepasst werden. Insbesondere werden Schwingungen unterdrückt, welche die Infrastruktur oder die Umgebung im Nahfeld belasten.

[0019] In vorzugsweisen Ausgestaltungen ist die erste kristalline Federstruktur vorzugsweise entlang der Längsachse seriell, direkt oder indirekt, mit wenigstens einer zweiten kristallinen oder elastischen Federstruktur, zum Beispiel einem Elastomer, verbunden, die mechanische Schwingungen in einem zweiten Frequenzbereich von vorzugsweise 40 Hz - 500 Hz zumindest teilweise absorbiert und/oder reflektiert. Durch Kombination unterschiedlicher Dämpfungssysteme mit kristallinen und elastischen Federstrukturen können vorteilhaft beliebige Dämpfungsverläufe des Gesamtsystems erreicht werden. Dabei können kristalline Federstrukturen auch einem Kristallgitter entsprechen linear oder nichtlinear in einer oder mehreren Achsen gedehnt oder gestaucht wurde. Durch diese Massnahmen lassen sich die Schwingungseigenschaften bzw. Dämpfungseigenschaften des Dämpfungssystems über den gesamten Frequenzbereich zusätzlich wahlweise beeinflussen.

[0020] In erfindungsgemässen Lagervorrichtungen können kristalline Federstrukturen auch parallel zueinander vorgesehen und direkt oder indirekt miteinander verbunden werden.

[0021] Eine Lagervorrichtung kann dabei zur Lagerung nur einer Eisenbahnschiene oder zur Lagerung von zwei oder mehr Schienen vorgesehen werden. Falls die Lagervorrichtung zwei Schienen stützt, wird vorzugsweise für jede Schiene wenigstens eine erste kristalline Federstruktur vorgesehen. Vorzugsweise wird wenigstens eine zweite kristalline oder elastische Federstruktur vorgesehen, die sich z.B. über die gesamte Lagervorrichtung erstreckt.

[0022] Vorzugsweise weist zumindest die erste kristalline Federstruktur entlang der Längsachse zwei, drei

oder mehr übereinander liegende vorzugsweise identische Elementarzellen auf. Alternativ oder zusätzlich können die Elementarzellen auch seitlich mehrere aneinander anschliessende Elementarzellen aufweisen.

[0023] Zur Festlegung des Dämpfungsverhaltens über den relevanten Frequenzbereich können vorteilhaft auch Elementarzellen unterschiedlicher Beschaffenheit miteinander kombiniert werden. Vorzugsweise werden mehrere Lagen von unterschiedlichen Elementarzellen vorgesehen, die zur Dämpfung von Schwingungen jeweils in einem bestimmten Frequenzbereich vorgesehen sind.

[0024] Die vorhandenen kristallinen Federstrukturen können aus Metall oder Kunststoff gefertigt werden. Kristalline Federstrukturen, die zur Dämpfung von Vibrationen im untersten Frequenzbereich von z.B. 1 Hz bis 100 Hz vorgesehen sind, werden vorzugsweise aus Metall gefertigt. Kristalline bzw. elastische Federstrukturen, die zur Dämpfung von Vibrationen oberhalb des untersten Wellenbereichs z.B. oberhalb von 40 Hz vorgesehen sind, werden vorzugsweise aus Kunststoff, vorzugsweise einem Elastomer gefertigt.

[0025] Die erste und vorzugsweise auch alle weiteren kristallinen Federstrukturen sind vorzugsweise derart ausgebildet, dass bei einer Kräfteinwirkung entlang der Längsachse einerseits eine Stauchung entlang der Längsachse und andererseits eine Torsion oder Scherung senkrecht zur Längsachse der kristallinen Federstruktur erfolgt. Besonders vorteilhaft können Kristallstrukturen mit schiefwinkligen Achsensystemen eingesetzt werden, die Scherungen begünstigen.

[0026] Vorzugsweise sind die erste und gegebenenfalls auch die weiteren kristallinen Federstrukturen derart ausgebildet, dass die Bindungen zwischen Ionen und/oder Atomen der Kristallstruktur durch federelastische mechanische Verbindungselemente, wie gerade oder gekrümmte Stäbe aus Kunststoff oder Federstahl gebildet werden, die entsprechend der gewählten Kristallstruktur parallel oder geneigt zur Längsachse angeordnet sind. Bevorzugt werden rechteckige Stäbe mit einem Seitenverhältnis von 1:4 bis 1:8, welches Biegungen begünstigt.

[0027] In besonders bevorzugten Ausgestaltungen weist wenigstens die erste kristalline Federstruktur eine, zwei oder mehrere Verbindungsplatten aus Metall oder Kunststoff auf, die vorzugsweise senkrecht zur Dehnungsachse bzw. Längsachse ausgerichtet sind und in denen die Punkte einer Ebene der Gitterstruktur bzw. Kristallstruktur eingeschlossen sind, die durch die federelastischen mechanischen Verbindungselemente miteinander einstückig oder formschlüssig und/oder durch Schweißen miteinander verbunden sind. Vorzugsweise weisen die kristallinen Federelemente wenigstens eine Grundplatte und eine Deckplatte oder wenigstens eine Grundplatte, eine Zwischenplatte und eine Deckplatte auf. Durch die Verbindung der Gitterpunkte in einer Ebene nicht durch einzelne mechanische Verbindungselemente, sondern durch die Verbindungsplat-

ten, resultiert ein einfacher und stabiler Aufbau der kristallinen Federstruktur. Frei liegende Verbindungsplatten bzw. Zwischenplatten können dabei Scherbewegungen und/oder Drehbewegungen ausführen, wenn die kristalline Federstruktur belastet wird. Es ist jedoch auch möglich, alle Gitterpunkte einer Ebene der Gitterstruktur individuell durch mechanische Verbindungselemente miteinander zu verbinden. In der Folge werden Scherbewegungen oder Drehbewegungen in einer Gitterebene von allen darin liegenden Verbindungselementen gemeinsam vollzogen.

[0028] Die Abstützvorrichtung kann durch eine metallene Basisplatte oder durch eine einteilige oder mehrteilige Schwelle aus Holz, Kunststoff, Beton oder Metall gebildet werden, die gegebenenfalls als dicht abgeschlossener Hohlkörper ausgestaltet ist. Vorzugsweise wird die Abstützvorrichtung durch eine Kombination einer Basisplatte und einer Schwelle gebildet.

[0029] Die kristalline Federstruktur ist an die zugehörige Abstützvorrichtung bzw. Schwelle angepasst und weist z.B. eine Höhe in einem Bereich von 7.5 cm bis 40 cm auf. Die kristalline Federstruktur durchdringt die Abstützvorrichtung bzw. Schwelle ganz oder teilweise und überragt diese an der Oberkante um das erforderliche Mass von z.B. 0.2 cm bis 3 cm, sodass die Eisenbahnschiene unter Last nicht an der Abstützvorrichtung bzw. Schwelle anschlägt. Dabei ist zu beachten, dass die Amplituden der auftretenden Schwingungen meist relativ gering sind. Vorzugsweise werden die Amplituden der Schwingungen gemessen, wonach das Übermass der kristallinen Federstruktur entsprechend gewählt wird.

[0030] Die kristalline Federstruktur kann vorteilhaft in einer Ausnehmung der Schwelle auf diese abgestützt werden. In besonders bevorzugten Ausgestaltungen ist die erste kristalline Federstruktur hingegen auf eine Basisplatte aus Stahl abgestützt, die der Kraftverteilung der über die erste kristalline Federstruktur übertragenen Kräfte dient, so dass möglichst keine lokalen Kräfte auftreten. Wie erwähnt, kann eine massiv ausgestaltete Basisplatte als Abstützvorrichtung dienen. Vorzugsweise liegt die Basisplatte jedoch in Kombination mit einer Schwelle aus Holz, Metall, Beton oder Kunststoff vor, die der Lagervorrichtung eine gewünschte Grösse und Stabilität verleiht. Die Schwelle weist in diesem Fall eine durchgehende Ausnehmung auf, innerhalb der die kristalline Federstruktur einerseits auf die Basisplatte abgestützt ist und aus der die kristalline Federstruktur andererseits vorzugsweise herausragt. Selbstverständlich kann die Federstruktur auch mit zusätzlichen Elementen kombiniert werden, die z.B. aus der Ausnehmung herausragen.

[0031] Unterhalb der Basisplatte ist vorzugsweise eine Schwellenbesohlung vorgesehen, die von der Basisplatte übertragene mechanische Schwingungen in einem zweiten Frequenzbereich von vorzugsweise 40 Hz bis 500 Hz absorbiert oder reflektiert. Die vom Eisenbahnfahrzeug einwirkenden Schwingungen können durch die Lagervorrichtung anhand der verschiedenen Dämp-

fungselemente daher sequenziell in verschiedenen Frequenzbereichen vorteilhaft gedämpft werden.

[0032] Auf den ersten kristallinen Federstrukturen sind vorzugsweise dämpfende Zwischenlagen vorgesehen, auf denen die Eisenbahnschienen ruhen.

[0033] Die Schwellenbesohlung und die Zwischenlagen sind vorzugsweise als zweite oder weitere kristalline oder elastische Federstrukturen ausgebildet und umfassen vorzugsweise eine aus einem Elastomer gebildete Matrix, die ein kristallines Gitter mit sich periodisch wiederholenden Bereichen oder Elementarzellen aufweist.

[0034] Das Schwingungssystem umfasst in diesem Fall drei oder mehr phononische Kristallstrukturen, die in Frequenzbereichen störende Schwingungen ihre Dämpfungswirkung und/oder Reflexionswirkung entfalten.

[0035] Die Eisenbahnschienen sind ferner vorzugsweise mittels federelastischen Klemmen derart mit der Abstützvorrichtung verbunden, dass die erste kristalline Federstruktur vorzugsweise derart vorgespannt wird, dass die erste kristalline Federstruktur im vorgesehenen ersten Frequenzbereich arbeitet.

[0036] Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden nachstehend anhand von Figuren näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine erfindungsgemässe Lagervorrichtung 1 für zwei Eisenbahnschienen in einer ersten Ausgestaltung mit ersten kristallinen Federstrukturen 11 und einer zweiten kristallinen oder elastischen Federstruktur 13, welche je eine Eisenbahnschiene 6 stützen;

Fig. 2 eine erfindungsgemässe Lagervorrichtung 1 in einer zweiten Ausgestaltung mit in einer metallenen Hohlschwelle 120 angeordneten ersten kristallinen Federstrukturen 11 und einer zweiten elastischen oder kristallinen Federstruktur 13, welche je eine Eisenbahnschiene 6 stützen;

Fig. 3 eine erfindungsgemässe Lagervorrichtung 1 in einer dritten Ausgestaltung mit einer Schwelle 16 aus Beton, Holz oder Kunststoff und ersten kristallinen Federstrukturen 11, welche je eine Eisenbahnschiene 6 stützen und je in einer Ausnehmung 160 der Schwelle 16 angeordnet sind, und einer zweiten elastischen oder kristallinen Federstruktur 13;

Fig. 4 eine für den Einsatz in einer erfindungsgemässen Lagervorrichtung 1 vorgesehene kristalline Federstruktur 11 in exemplarischer Darstellung; und

Fig. 5 einen Dämpfungsverlauf einer erfindungsgemässen Lagervorrichtung.

[0037] Fig. 1 zeigt eine erfindungsgemässe Lagervor-

richtung 1 in einer ersten vorzugsweisen Ausgestaltung. Die Lagervorrichtung 1 ruht auf einem natürlichen oder künstlichen Unterbau 9, bzw. 90, auf dem eine Schicht Schotter 8 vorgesehen ist.

[0038] Die auf der Schotterschicht 8 ruhende Lagervorrichtung 1 umfasst eine massive metallene Basisplatte 12, auf der zwei kristalline bzw. phononische Federelemente 11 angeordnet sind, die je eine Eisenbahnschiene 6 stützen, auf denen die Räder 4 eines Schienenfahrzeugs abrollen. Die Basisplatte 12, über die sich die eingekoppelten Schwingungen verteilen, dient in diesem Fall als alleinige Abstützvorrichtung 12.

[0039] Die kristallinen Federstrukturen 11, die symbolisch gezeigt sind, weisen eine periodische dreidimensionale Kristallstruktur auf, die mechanische Schwingungen in einem ersten Frequenzbereich von vorzugsweise 1 Hz - 200 Hz zumindest teilweise absorbiert und/oder reflektiert. Analog zu einem photonischen Lichtwellenleiter, der Licht einer bestimmten Wellenlänge nicht passieren lässt, lassen auch die kristallinen Federstrukturen 11 Schwingungen einer bestimmten Frequenz nicht passieren und absorbieren oder reflektieren die eintreffenden Schwingungen.

[0040] Die kristallinen Federstrukturen 11 weisen in den exemplarisch gezeigten Ausgestaltungen eine auf der Basisplatte 12 ruhende Bodenplatte 111B und eine Deckplatte 111T auf, die die zugehörige Eisenbahnschiene 6 trägt. In dieser vorzugsweisen Ausgestaltung sind die Bodenplatte 111B und die Deckplatte 111T durch federelastische mechanische Verbindungselemente 112BI, 112IT mit einer Zwischenplatte 111I verbunden. Die Verbindungselemente 112BI, 112IT entsprechen den Bindungen zwischen den Atomen oder Ionen der Kristallstruktur.

[0041] Die Bodenplatte 111B, die Zwischenplatte 111I und die Deckplatte 111T liegen in benachbarten Ebenen der Gitterstruktur, in denen die Atome oder Ionen angeordnet sind. Die Kristallstrukturen können jedoch weit komplexer ausgebildet sein und mechanische Verbindungselemente 112BI, 112IT aufweisen, die zwischen der Bodenplatte 111B, der Zwischenplatte 111I und der Deckplatte 111T zu weiteren Gitterpunkten geführt und dort gegebenenfalls miteinander verbunden sind oder die entsprechenden Gitterpunkte durchlaufen.

[0042] Die Kristallstrukturen zwischen der Bodenplatte 111B und der Zwischenplatte 111I einerseits und der Zwischenplatte 111I sowie der Deckplatte 111T andererseits können identisch oder unterschiedlich ausgestaltet sein, sodass zwei miteinander verbundene Dämpfungssysteme resultieren, die ein unterschiedliches Dämpfungsverhalten bzw. unterschiedliche Dämpfungskurven oder Filterkurven aufweisen. Es sind beliebige kristalline Federstrukturen 11 realisierbar, die einen oder mehrere untergeordnete kristalline Federstrukturen aufweisen, die zusammenwirken, um ein optimales Dämpfungsverhalten über das relevante Frequenzspektrum zu erzielen. Beispielsweise können beide kristallinen Federstrukturen 11 Schwingungen im Bereich von 1 Hz bis 150

Hz mit gleicher Weise dämpfen. Alternativ kann eine der Federstrukturen 11 auf einen Frequenzbereich von z.B. 1 Hz bis 20 Hz und die andere Federstrukturen auf einen Frequenzbereich von 20 Hz bis 150 Hz abgestimmt sein.

5 Die Frequenzbereiche, in denen die kristallinen Federstrukturen 11 ihre Wirkung entfalten sollen, werden derart gewählt, dass insbesondere stark störende Schwingungen und Erschütterungen besonders gut reduziert werden.

10 **[0043]** An der Unterseite der Basisplatte 12 ist eine Schwellenbesohlung 13 aus einem elastischen Material vorgesehen, die von der Basisplatte 12 übertragene mechanische Schwingungen in einem zweiten Frequenzbereich von vorzugsweise 40 Hz bis 500 Hz absorbiert oder reflektiert.

15 **[0044]** Auf den ersten kristallinen Federstrukturen 11 sind zudem elastische Zwischenlagen 14 vorgesehen, auf denen die Eisenbahnschienen 6 ruhen. Die elastischen Zwischenlagen 14 dienen der Fixierung der Schienen 6 und gleichzeitig auch als erste Dämpfungsschichten.

20 **[0045]** Die Schwellenbesohlung 13 und/oder die Zwischenlage 14 sind vorzugsweise als zweite bzw. weitere kristalline bzw. phononische Federstruktur ausgebildet und umfassen vorzugsweise eine Matrix aus einem Elastomer, die ein kristallines Gitter mit sich periodisch wiederholenden Bereichen oder Elementarzellen bildet. Entsprechende Materialien sind z.B. aus der [5], WO2012151472A2 bekannt.

25 **[0046]** Die erste kristalline Federstruktur 11 besteht daher vorzugsweise aus hartelastischen Metallteilen, während die als Schwellenbesohlung 13 ausgebildete zweite Federstruktur 13 und vorzugsweise auch die Zwischenlage 14 aus einem hartelastischen, aber im Vergleich zur ersten kristallinen Federstruktur 11 relativ weichen Kunststoff bestehen. Die Federstrukturen 11, 13, 14 ergänzen sich zu einem vorteilhaften Dämpfungssystem und sind auf die kritischen Frequenzbereiche abgestimmt. Jede Federstruktur kann auf eine oder mehrere Frequenzen abgestimmt sein, in deren Bereich Schwingungen gedämpft oder reflektiert werden sollen. Die Federstruktur 14 wird vorzugsweise derart dimensioniert und konstruiert, dass möglichst wenig Lärm von der Schiene und Schwelle abgestrahlt wird.

30 **[0047]** Fig. 1 zeigt ferner, dass benachbart zu jeder kristallinen Federstruktur 11 wenigstens ein Begrenzungselement 18 angeordnet ist. Das Begrenzungselement 18 verhindert eine unzulässige seitliche Auslenkung bzw. Ausschlag der kristallinen Federstruktur 11 und ist von dieser durch einen Luftspalt 181 begrenzt. Der Luftspalt 181 ist derart bemessen, dass Scherbewegungen und Drehbewegungen der kristallinen Federstruktur 11 erfolgen können, ein Materialbruch jedoch verhindert wird. Vorzugsweise werden nur Scherbewegungen im linearen Kraft-Dehnungsbereich der kristallinen Federstruktur 11 erlaubt, die zu keiner Überbelastung und zu keinem Bruch der kristallinen Federstruktur 11 führen.

[0048] Das vorzugsweise metallene Begrenzungselement 18 ist z.B. plattenförmig oder röhrenförmig ausgebildet und mit der Basisplatte 12 verschraubt oder verschweisst. Z.B. umschliessen vier kreuzförmig ausgerichtete Winkелеlemente 18 mit vertikal ausgerichteten Platten die kristalline Federstruktur 11.

[0049] Die Eisenbahnschienen 6 sind ferner mittels federelastischen Klemmen 15 derart mit der Abstützvorrichtung bzw. der Basisplatte 12 verbunden, dass die erste kristalline Federstruktur 11 vorzugsweise vorgespannt wird und im gewünschten ersten Frequenzbereich arbeitet.

[0050] Fig. 2 zeigt die Lagervorrichtung 1 von Fig. 1 in einer zweiten Ausgestaltung mit einer metallenen Hohlschwelle 120, die vorzugsweise quaderförmig ausgestaltet ist und in der kristalline Federstrukturen 11 angeordnet sind. Die Hohlschwelle 120, die vorzugsweise dicht abgeschlossen ist, umfasst an der Unterseite die metallene Basisplatte 12 und an der Oberseite eine metallene Oberplatte 121. Die Hohlschwelle 120 kann aus einer einzigen Metallplatte bzw. ausgeschnittenen Abwicklung gefertigt bzw. gebogen werden, die z.B. eine Dicke im Bereich von 4 mm bis 10 mm aufweist.

[0051] Fig. 2 zeigt zwei mögliche Varianten A (links) und B (rechts) der Anordnung der kristallinen Federstrukturen 11. Entweder wird Variante A oder Variante B realisiert.

[0052] Variante A (links) zeigt, dass die kristalline Federstruktur 11 mit der Deckplatte 111T an der Oberplatte 121 und mit der Grundplatte 111B an der Basisplatte 12 der Hohlschwelle 120 anliegt. Deformationen der Hohlschwelle 120 werden durch die kristalline Federstruktur 11 somit gedämpft. Die Seitenwände der Hohlschwelle 120 sind mit wenigstens einem Federelement, z.B. einer federelastischen Sicke 125 versehen, die der Hohlschwelle 120 Elastizität verleiht, sodass diese den Bewegungen der ersten kristallinen Federstrukturen 11 folgen kann.

[0053] Variante B (rechts) zeigt, dass die dortige kristalline Federstruktur 11 durch die Oberplatte 121 hindurch nach aussen geführt ist. Die dazu erforderliche Öffnung in der Oberplatte 121 ist durch ein elastisches Material 126, vorzugsweise einen Elastomer abgedichtet. Die Hohlschwelle 120 ist somit dicht abgeschlossen, erlaubt aber die direkte Kopplung der kristallinen Federstruktur 11 mit der Eisenbahnschiene 6.

[0054] Die Eisenbahnschiene 6 kann in den Varianten A und B mittels federelastischen Klemmen 15 fest montiert oder verschiebbar gelagert und mit einem Weichenantrieb 5 verbunden sein. Dazu wird auf jeder kristallinen Federstruktur 11 vorzugsweise eine Lagerplatte 7 vorgesehen, auf der die gelagerte Eisenbahnschiene 6 verschiebbar ist. Erfindungsgemäss Lagervorrichtungen 1 können somit auch für den Aufbau von Weichen vorteilhaft verwendet werden. In diesem Anwendungsfall werden vorzugsweise breitere kristalline Federstrukturen 11 vorgesehen.

[0055] Selbstverständlich kann die Eisenbahnschiene

6 auch in diesem Ausführungsbeispiel fest montiert und auf eine Zwischenlage 14 abgestützt werden, wie dies in Fig. 1 gezeigt ist.

[0056] Fig. 3 zeigt die Lagervorrichtung 1 von Fig. 1 in einer dritten Ausgestaltung wiederum in zwei Varianten A (links) und B (rechts). Die Lagervorrichtung 1 kann einteilig oder zweiteilig ausgestaltet sein und umfasst eine Schwelle 16 oder Schwellenteile 161, 162 aus Beton, Holz oder Kunststoff. In beiden Varianten A und B sind die kristallinen Federstrukturen 11 in einer Ausnehmung 160 der Schwelle 16 angeordnet und durch einen Luftspalt 166 von der Schwelle 16 getrennt.

[0057] In Variante A durchläuft die Ausnehmung 160 die gesamte Schwelle 16, sodass die kristalline Federstruktur 11 auf die Basisplatte 12 abgestützt werden kann. Die Eisenbahnschiene 6 ist durch eine Zwischenlage 14 von der kristallinen Federstruktur 11 getrennt und durch federelastische Klemmen 15 gehalten, die mit der Schwelle 16 verschraubt sind.

[0058] In Variante B durchläuft die Ausnehmung 160 die Schwelle 16 nicht vollständig und ist z.B. becherförmig in die Schwelle 16 eingelassen, sodass die kristalline Federstruktur 11 auf einem Teil der Schwelle 16 abgestützt ist. Der Durchmesser der Ausnehmung 160 ist wiederum etwas grösser bemessen als der Durchmesser der kristallinen Federstruktur 11, sodass ein Luftspalt 166 verbleibt.

[0059] Fig. 4 zeigt eine für den Einsatz in einer erfindungsgemässen Lagervorrichtung 1 vorgesehene kristalline Federstruktur 11 in exemplarischer Darstellung. Die makroskopische kristalline Federstruktur 11 weist eine Kristallstruktur mit einem dreidimensionalen Kristallgitter oder Punktgitter auf, mit Abständen der Punkte, die um ein Vielfaches vergrössert sind und im Bereich von einigen Zentimetern, z.B. 2.5 cm bis 60 cm, liegen.

[0060] Gewählt wurde eine einfache dreidimensionale Kristallstruktur mit rechtwinkligem (orthogonalen) Achsensystemen oder schiefwinkligen Achsensystemen. Unter Last, wie gezeigt, ist die Art des Achsensystems nicht mehr erkennbar.

[0061] Die kristalline Federstruktur weist drei parallel zueinander ausgerichtete Verbindungsplatten, eine Grundplatte 111B, eine Zwischenplatte 111I, eine Deckplatte 111T, aus Metall oder Kunststoff auf, die senkrecht zur Dehnungsachse bzw. Längsachse y ausgerichtet sind und in denen die Punkte je einer Ebene der Gitterstruktur bzw. Kristallstruktur eingeschlossen sind. Die Punkte der Gitterstruktur sind durch federelastische mechanische Verbindungselemente miteinander verbunden. Die Verbindungselemente sind vorzugsweise in Öffnungen der Verbindungsplatten formschlüssig gehalten und/oder mit den Verbindungsplatten verschweisst. Die Verbindungsplatten und die vorzugsweise stabförmigen Verbindungselemente können auch einstückig miteinander verbunden sein und z.B. anhand eines Giessverfahrens oder 3D-Konstruktionsverfahrens gefertigt werden.

[0062] Verhalten der kristallinen Federstruktur: Durch eine parallel zur Längsachse y eingeleitete Kraft wurden

die beiden Verbindungsplatten 111B, 111T gegeneinander gedrückt. Bei diesem Vorgang wurden die stabförmigen Verbindungselemente 112BI, 112IT verbogen und/oder geneigt, wodurch eine Scherbewegung oder Drehung der Zwischenplatte 111I verursacht wurde.

[0063] Nach der Entlastung der kristallinen Federstruktur 11 fällt diese in die Ruhelage zurück und es kann festgestellt werden, ob ein rechtwinkliges (orthogonale Ausrichtung der Verbindungselemente 112BI; 112IT) oder schiefwinkliges Achsensystem (geneigte Ausrichtung der Verbindungselemente 112BI; 112IT) vorliegt.

[0064] Fig. 5 zeigt einen Dämpfungsverlauf oder Frequenzverlauf einer erfindungsgemässen Lagervorrichtung 1. Durch Wahl der Kristallstruktur sowie der Abmessungen und Beschaffenheit der Verbindungsplatten 111B, 111I, 111T und der Verbindungselemente 112BI; 112IT kann das Dämpfungsverhalten oder Filterverhalten der kristallinen Federstruktur 11 festgelegt werden. Die fett gezeichnete Linie zeigt in einem ersten Beispiel, dass die erste kristalline Federstruktur 11 die Schwingungen mit den Frequenzen im Bereich von 1 Hz bis 100 Hz gut dämpfen kann. Während die Dämpfungslinie von 1 Hz bis nahezu 100 Hz beim ersten Beispiel nahezu linear verläuft, ist in einem zweiten Beispiel mit einer strichpunktierten gezeigt, dass in bestimmten Frequenzbereichen auch eine reduzierte Dämpfung vorliegen kann (exemplarisch bei 10 Hz). Es wird daher gemessen, bei welchen Frequenzen störende Schwingungen auftreten. In der Folge werden entsprechend abgestimmte kristalline Federstrukturen 11 eingesetzt und gegebenenfalls miteinander kombiniert, um Schwingungen insbesondere in den Bereichen zu unterdrücken, an denen sie störend oder schädigend in Erscheinung treten.

Literaturverzeichnis

[0065]

[1] Klaus Lieberenz et. al., Dynamische Stabilität der Fahrbahn, Edition ETR 2005

[2] DE102013209495A1

[3] Gorishnyy et. al., Sound ideas, Physics World, Dez. 2005

[4] Delpero et. al., Structural engineering of three-dimensional phononic crystals, Journal of Sound and Vibration, November 2015

[5] WO2012151472A2

Patentansprüche

1. Lagervorrichtung (1) für wenigstens eine Eisenbahnschiene (6), die auf einem elastischen Element (11) ruht, welches an einer Abstützvorrichtung anliegt,

dadurch gekennzeichnet, dass das elastische Element (11) eine erste makroskopische kristalline Federstruktur (11) ist, die mit ihrer Längsachse (y) senkrecht zur Eisenbahnschiene (6) ausgerichtet ist und die eine periodische dreidimensionale Kristallstruktur aufweist, die mechanische Schwingungen in einem ersten Frequenzbereich von vorzugsweise 1 Hz - 200 Hz zumindest teilweise absorbiert und/oder reflektiert.

2. Lagervorrichtung (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste kristalline Federstruktur (11) vorzugsweise entlang der Längsachse (y) seriell, direkt oder indirekt, mit wenigstens einer zweiten kristallinen Federstruktur (11, 13) verbunden ist, die mechanische Schwingungen in einem zweiten Frequenzbereich von vorzugsweise 40 Hz - 500 Hz zumindest teilweise absorbiert und/oder reflektiert.

3. Lagervorrichtung (1) nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest die erste kristalline Federstruktur (11) die Kristallstruktur eines metallenen oder nicht-metallenen Elements oder eines Halbleiters aufweist und/oder dass zumindest die erste kristalline Federstruktur (11) entlang der Längsachse (y) zwei, drei oder mehr übereinander liegende identische oder verschiedene Elementarzellen aufweist und/oder dass zumindest die erste kristalline Federstruktur (11) entlang der Längsachse (y) zwei, drei oder mehr übereinander liegende Elementarzellen aufweist, an die gegebenenfalls seitlich weitere Elementarzellen anschliessen.

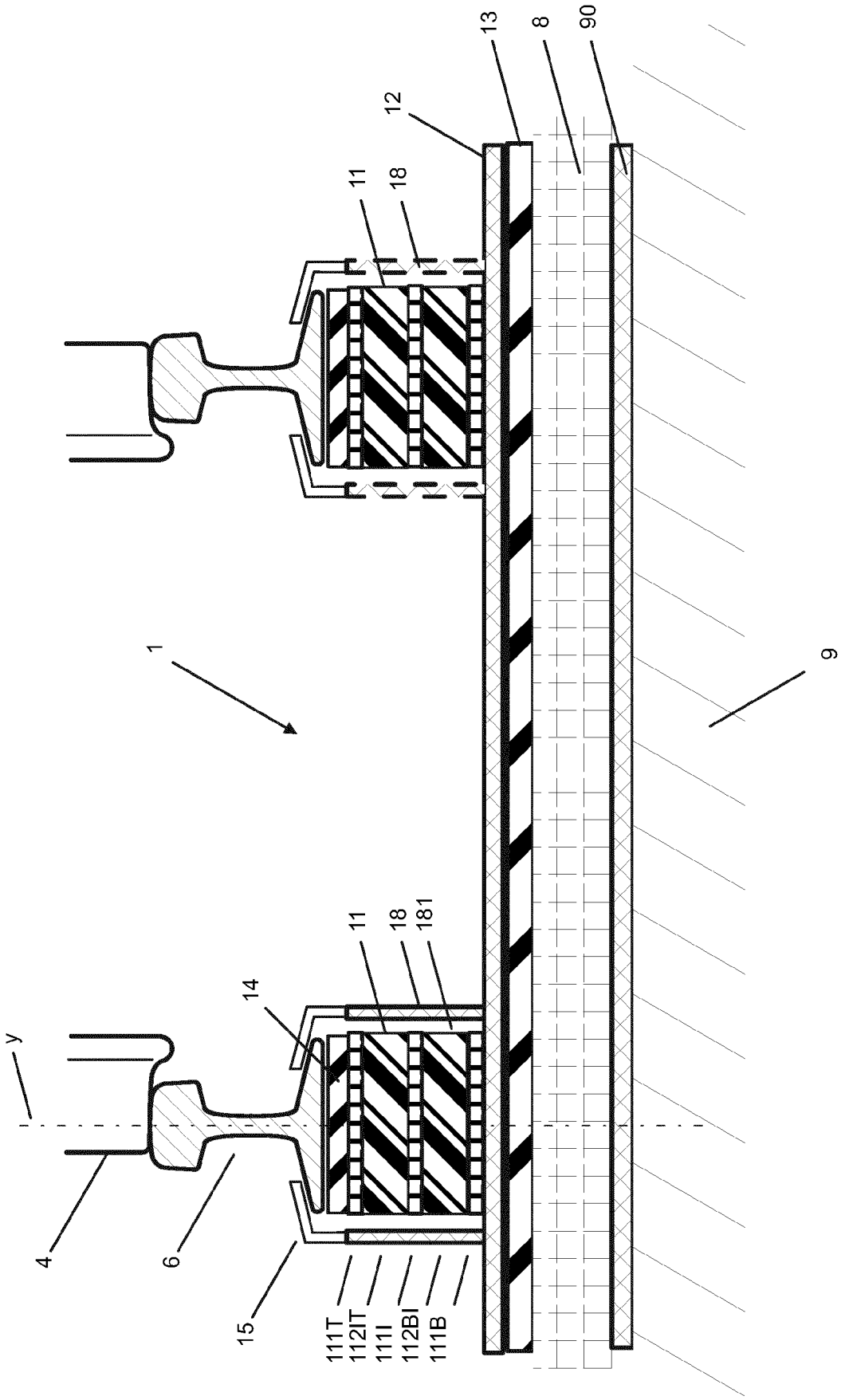
4. Lagervorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 - 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** wenigstens die erste kristalline Federstruktur (11; 11, 13) aus Metall oder Kunststoff gefertigt sind und/oder dass zumindest die erste kristalline Federstruktur (11) derart ausgebildet ist, dass bei einer Kraftereinwirkung entlang der Längsachse (y) einerseits eine Stauchung und andererseits eine Torsion oder Scherung der kristallinen Federstruktur (11) erfolgt.

5. Lagervorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 - 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest die erste kristalline Federstruktur (11) derart ausgebildet ist, dass die Bindungen zwischen Ionen und/oder Atomen der Kristallstruktur durch federelastische mechanische Verbindungselemente (112BI; 112IT), wie gerade oder gekrümmte Stäbe aus Kunststoff oder Metall, vorzugsweise wie ein Schwein rührte das war gemacht es Mirko bislang Federstahl, gebildet werden, die parallel oder geneigt zur Längsachse (y) angeordnet sind.

6. Lagervorrichtung (1) nach Anspruch 5, **dadurch ge-**

- kennzeichnet, dass** zumindest die erste kristalline Federstruktur (11) eine, zwei oder mehrere Verbindungsplatten (111B, 111I, 111T) aus Metall oder Kunststoff aufweist, die senkrecht zur Dehnungsachse bzw. Längsachse (y) ausgerichtet sind und in denen die Punkte einer Ebene der Gitterstruktur bzw. Kristallstruktur eingeschlossen sind, die durch die federelastischen mechanischen Verbindungselemente (112BI; 112IT) miteinander einstückig oder formschlüssig verbunden oder verschweisst sind.
7. Lagervorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 - 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Abstützvorrichtung durch eine metallene Basisplatte (12) oder durch eine einteilige oder mehrteilige Schwelle (13, 16) aus Holz, Kunststoff, Beton oder Metall gebildet wird, die gegebenenfalls als dicht abgeschlossener Hohlkörper ausgestaltet ist oder dass die Abstützvorrichtung eine Kombination der Basisplatte (12) und der Schwelle (13, 16) ist.
8. Lagervorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 - 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste kristalline Federstruktur (11) auf die Basisplatte (12) aus Stahl abgestützt ist, die der Absorption und/oder Verteilung der über die erste kristalline Federstruktur (11) übertragenen Schwingungen und Kräfte dient.
9. Lagervorrichtung (1) nach Anspruch 1 - 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste kristalline Federstruktur (11) eine Höhe in einem Bereich von 7.5 cm bis 20 cm aufweist und/oder dass die kristalline Federstruktur (11) die Schwelle (13, 16) zumindest teilweise durchdringt und in der Höhe vorzugsweise um 0.2 cm bis 3 cm überragt.
10. Lagervorrichtung (1) nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** unterhalb der Basisplatte (12) eine Schwellenbesohlung (13) vorgesehen ist, die von der Basisplatte (12) übertragene mechanischen Schwingungen in einem zweiten Frequenzbereich von vorzugsweise 40 Hz bis 500 Hz absorbiert oder reflektiert.
11. Lagervorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 - 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die wenigstens eine Eisenbahnschiene (6) durch eine Zwischenlage (14) mit der ersten kristallinen Federstruktur (11) verbunden ist.
12. Lagervorrichtung (1) nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Schwellenbesohlung (13) und/oder die Zwischenlage (14) als zweite bzw. weitere kristalline Federstruktur ausgebildet sind und eine Matrix aus einem Elastomer umfassen, die ein kristallines Gitter mit sich periodisch wiederholenden Bereichen oder Elementarzellen bildet.
13. Lagervorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 - 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** von der ersten kristallinen Federstruktur (11) durch einen Luftspalt (161, 181) getrennt wenigstens ein Begrenzungselement (16, 18) vorgesehen ist, welches die seitliche Auslenkung der Federstruktur (11) begrenzt.
14. Lagervorrichtung (1) nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** das wenigstens eine Begrenzungselement (16, 18) ein auf der Basisplatte (11) ruhender Hohlzylinder (18) oder angrenzendes Material der Schwelle (16) ist, die eine Ausnehmung (160) zur Aufnahme der ersten kristallinen Federstruktur (11) aufweist.
15. Lagervorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 - 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** die wenigstens eine Eisenbahnschiene (6) mittels federelastischen Klemmen (15) derart mit der Abstützvorrichtung verbunden ist, dass die erste kristalline Federstruktur (11) vorzugsweise derart vorgespannt wird, dass die erste kristalline Federstruktur (11) im vorgesehenen ersten Frequenzbereich arbeitet.

Fig. 1



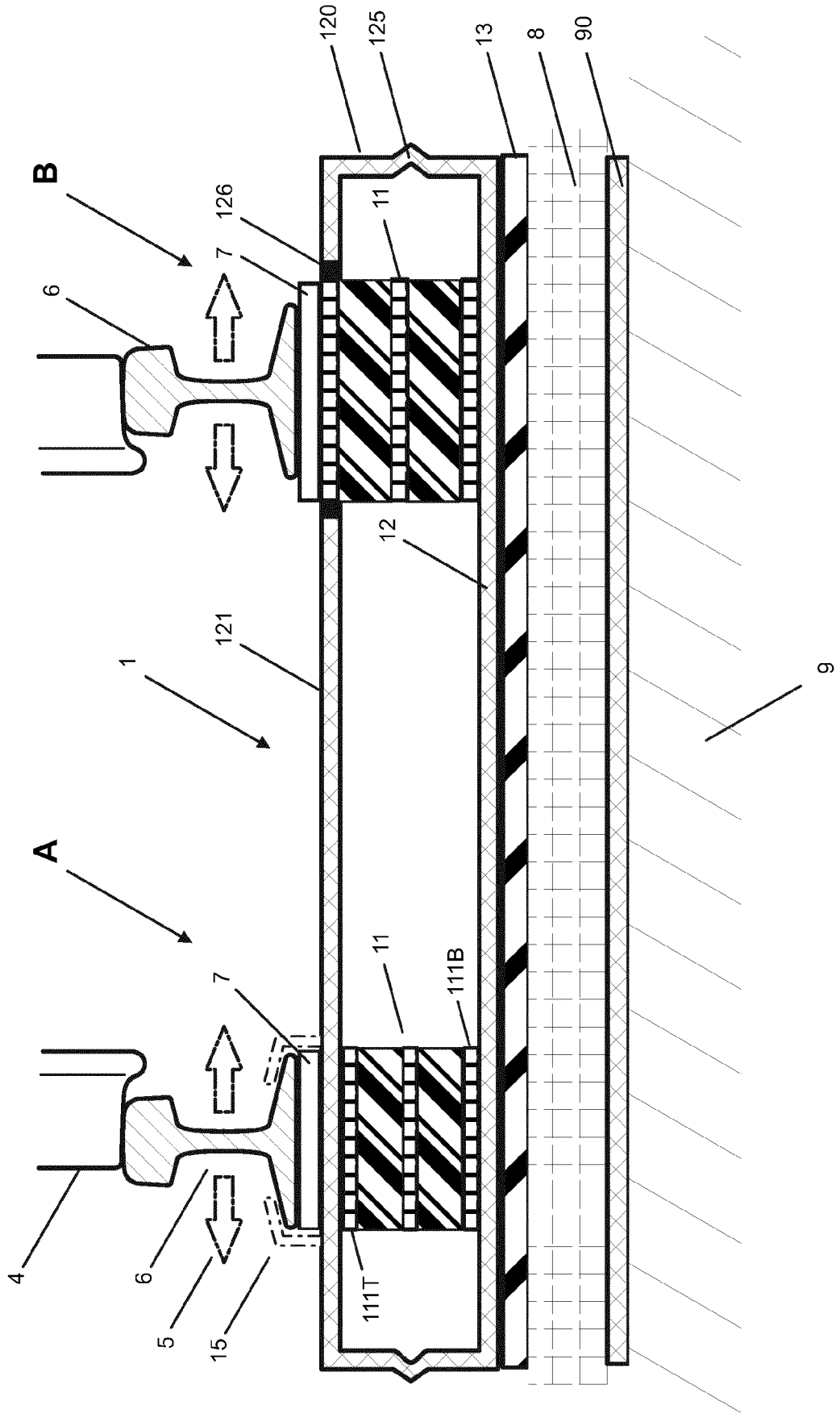


Fig. 2

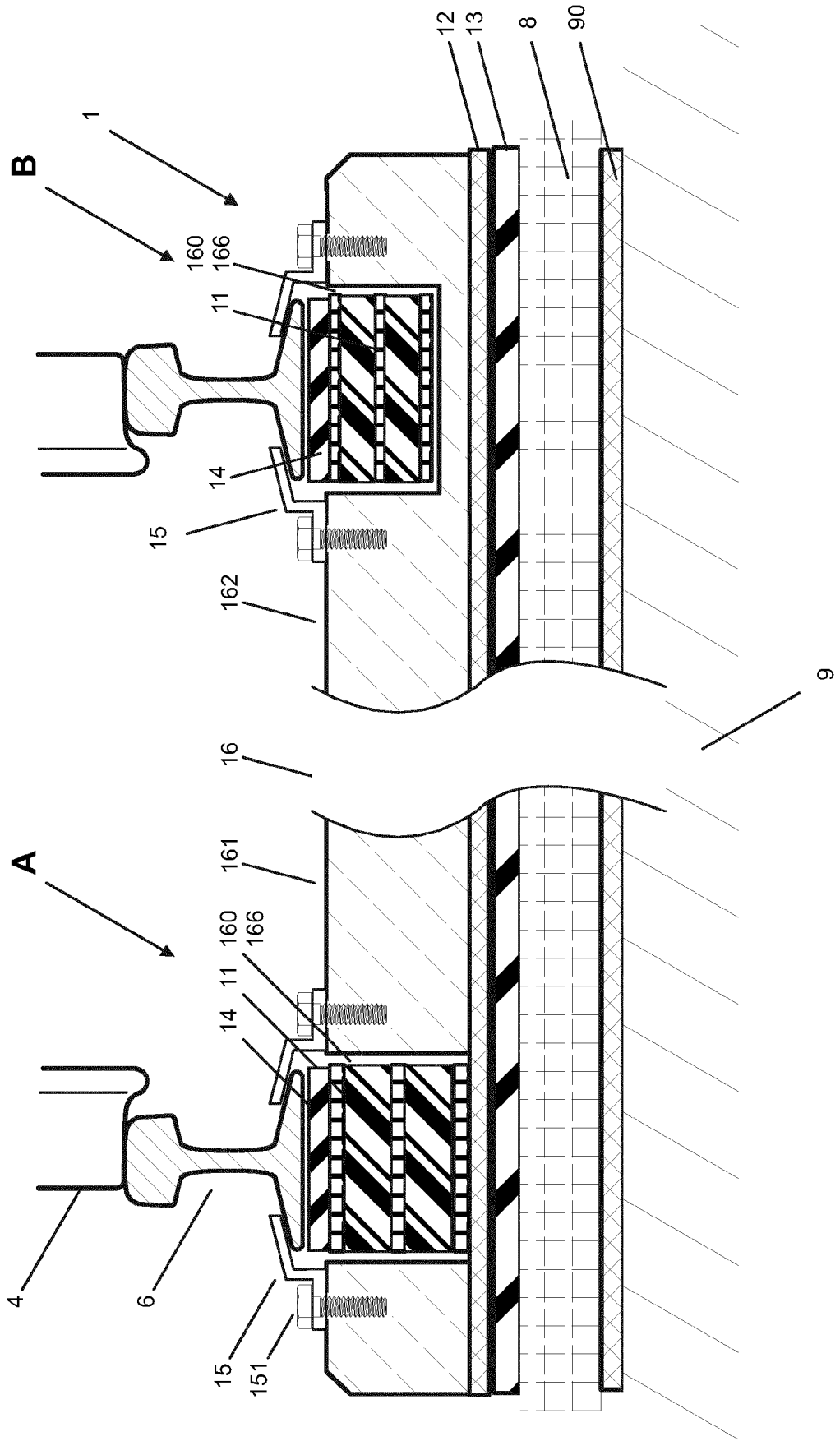


Fig. 3

Fig. 5

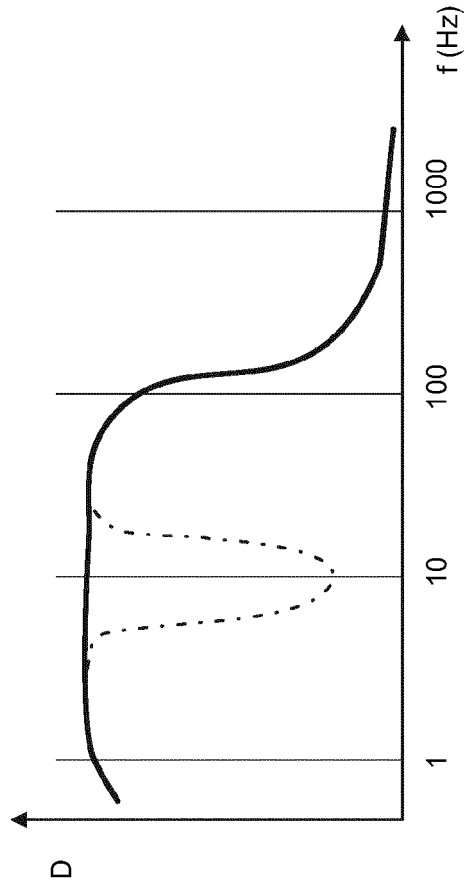
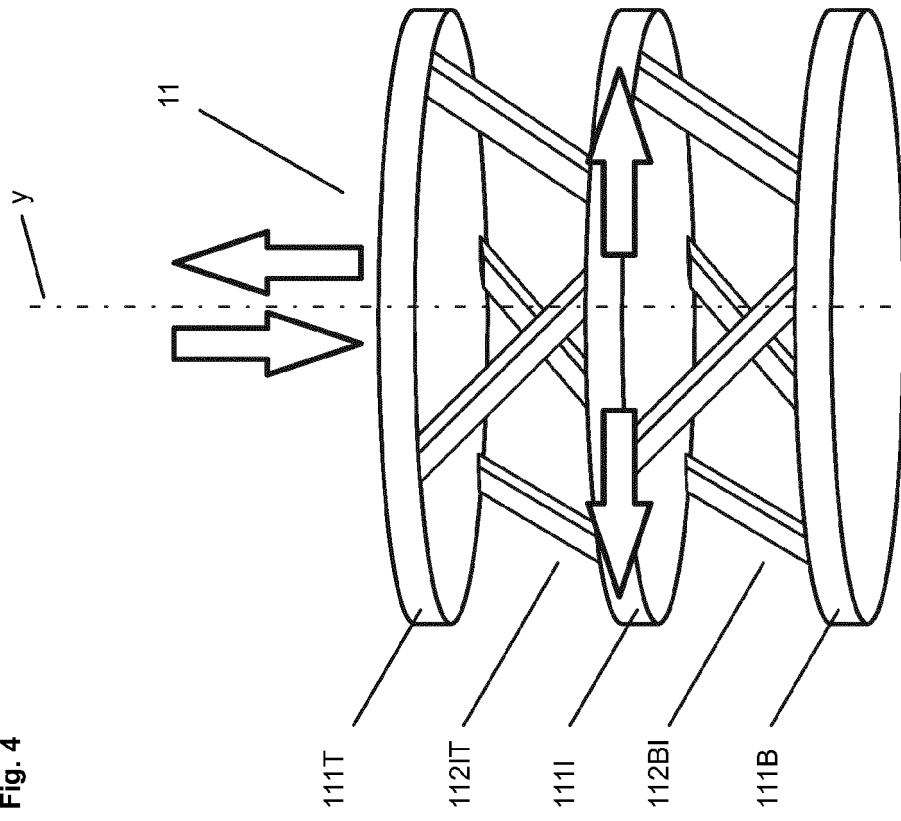


Fig. 4





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 17 18 7153

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	EP 3 121 333 A1 (STEINHAUSER CONSULTING ENG ZT GMBH [AT]) 25. Januar 2017 (2017-01-25)	1,14	INV. E01B19/00
A	* Seite 1, Absatz [0004]-[0007]; Ansprüche 1,2; Abbildungen 1-9 *	2-13,15	ADD. E01B2/00
A,D	----- WO 2012/151472 A2 (MASSACHUSETTS INST TECHNOLOGY [US]; KOH CHEONG YANG [SG]; ALCAZAR JORB) 8. November 2012 (2012-11-08) * das ganze Dokument *	1-15	
A	----- EP 1 783 275 A1 (GERB QINGDAO VIBRATION CONTROL [CN]) 9. Mai 2007 (2007-05-09) * Zusammenfassung; Abbildungen 1-11 *	1-15	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			E01B
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 8. Februar 2018	Prüfer Fernandez, Eva
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentedokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument ----- & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 17 18 7153

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

08-02-2018

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
	EP 3121333	A1	25-01-2017	AT	517573 A1	15-02-2017
				EP	3121333 A1	25-01-2017
15	WO 2012151472	A2	08-11-2012	US	2013025961 A1	31-01-2013
				WO	2012151472 A2	08-11-2012
20	EP 1783275	A1	09-05-2007	BR	PI0513626 A	13-05-2008
				CN	1707026 A	14-12-2005
				CN	101023218 A	22-08-2007
				EP	1783275 A1	09-05-2007
				HK	1102695 A1	29-10-2010
				JP	4745338 B2	10-08-2011
				JP	2008507640 A	13-03-2008
25				KR	20070039599 A	12-04-2007
				WO	2006007791 A1	26-01-2006

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

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

- DE 102013209495 A1 [0003] [0065]
- WO 2012151472 A2 [0045] [0065]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **KLAUS LIEBERENZ.** Dynamische Stabilität der Fahrbahn. 2005 [0002] [0065]
- **GORISHNYI.** *Sound ideas, Physics World*, Dezember 2005 [0014] [0065]
- **DELPERO.** *Structural engineering of three-dimensional phononic crystals, Journal of Sound and Vibration*, November 2015 [0016]
- **DELPERO.** *Structural engineering of three-dimensional phononic crystals. Journal of Sound and Vibration*, November 2015 [0065]