



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
28.09.2022 Patentblatt 2022/39

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
B61L 3/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **21164907.4**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
B61L 3/006

(22) Anmeldetag: **25.03.2021**

(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:
KH MA MD TN

(72) Erfinder:
• **Campbell-Smith, Caroline**
38100 Braunschweig (DE)
• **Erhard, Karl-Heinz**
38126 Braunschweig (DE)
• **Hein, Daniel**
81549 München (DE)
• **Limmer, Steffen**
80687 München (DE)

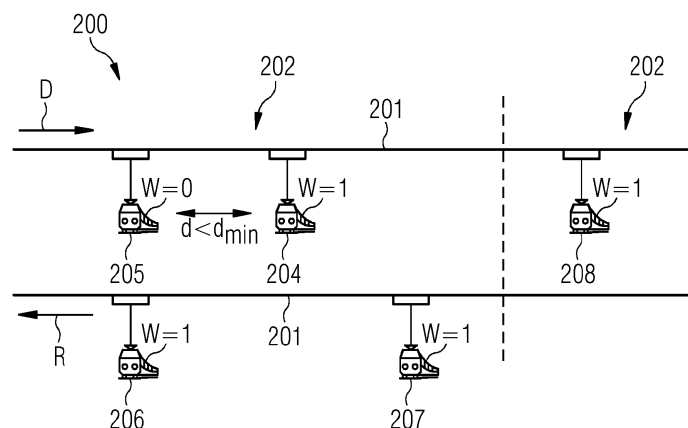
(71) Anmelder: **Siemens Mobility GmbH**
81739 München (DE)

(54) **VERFAHREN ZUM OPTIMIEREN EINES SCHIENENVERKEHRS EINES SCHIENENVERKEHRSNETZES**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren (100) zum Optimieren eines Schienenverkehrs eines Schienenverkehrsnetzes (200) mit einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203), wobei das Verfahren (100) umfasst:
- Ermitteln (101) von Zuverlässigkeitswerten (W) für Schienenfahrzeuge (203) des Schienenverkehrsnetzes (200) basierend auf Zustandsdaten der Schienenfahrzeuge (203);
- Ermitteln (103) von Energietrajektorien (ET) der Schienenfahrzeuge (203) basierend auf den Zustandsdaten und zeitlichen Steuerparametern (P1, P2, P3, P4) der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203);
- Ermitteln (105) eines Energiebedarfswerts (GE) der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203) des Schienenverkehrsnetzes (200) basierend auf den Energietrajektorien (ET) und zeitlichen Steuerparametern (P1, P2, P3, P4) der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203);

- Variieren (107) der zeitlichen Steuerparameter (P1, P2, P3, P4) der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203) von vorbestimmten Referenzwerten (PR) in Abhängigkeit der Zuverlässigkeitswerte (W);
- Generieren (109) eines optimierten Satzes (P) der zeitlichen Steuerparameter, wobei eine Steuerung der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203) gemäß dem optimierten Satz (P) von zeitlichen Steuerparametern zu einem minimierten Energiebedarfswert (GE) der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203) führt; und
- Bereitstellen (111) des optimierten Satzes (P) von zeitlichen Steuerparametern der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203).

FIG 2



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Optimieren eines Schienenverkehrs eines Schienenverkehrsnetzes mit einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen.

[0002] Für das effiziente Betreiben von Schienenverkehrsnetzen ist das Verhindern von Verspätungen der Züge und das Einhalten von Fahrplänen nicht nur mit Blick auf eine Kundenzufriedenheit von Wichtigkeit. Auch im Hinblick auf die Auslastung der Kapazitäten des Schienenverkehrsnetzes ist die Einhaltung entsprechend optimierter Fahrpläne von Interesse. Insbesondere auf einen Energieverbrauch optimierte Fahrpläne sind nicht nur bezüglich wirtschaftlicher Aspekte, sondern auch im Hinblick auf eine energiepolitische Zielsetzung für das Betreiben entsprechender Schienenverkehrsnetze wichtig.

[0003] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes Verfahren zum Optimieren eines Schienenverkehrs eines Schienenverkehrsnetzes mit einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen bereitzustellen.

[0004] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren zum Optimieren eines Schienenverkehrs eines Schienenverkehrsnetzes mit einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen gemäß dem unabhängigen Anspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0005] Nach einem Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zum Optimieren eines Schienenverkehrs eines Schienenverkehrsnetzes mit einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen bereitgestellt, wobei das Verfahren umfasst:

- Ermitteln von Zuverlässigkeitswerten für Schienenfahrzeuge des Schienenverkehrsnetzes basierend auf Zustandsdaten der Schienenfahrzeuge, wobei die Zustandsdaten Betriebszustände der Schienenfahrzeuge innerhalb des Schienenverkehrsnetzes beschreiben, und wobei ein Zuverlässigkeitswert für ein Schienenfahrzeug in einem bestimmten Betriebszustand eine Wahrscheinlichkeit angibt, dass das Schienenfahrzeug gemäß einer energieoptimierten Referenztrajektorie verfahrbar ist;
- Ermitteln von Energietrajektorien der Schienenfahrzeuge basierend auf den Zustandsdaten und Zuverlässigkeitswerten der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen, wobei eine Energietrajektorie einen Energieverbrauch eines Schienenfahrzeugs für einen durch das Schienenfahrzeug zu befahrenden Streckenabschnitt des Schienenverkehrsnetzes beschreibt;
- Ermitteln eines Energiebedarfswerts der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen des Schienenverkehrsnetzes basierend auf den Energietrajektorien und zeitlichen Steuerparametern der Mehrzahl von Energietrajektorien;
- Variieren der zeitlichen Steuerparameter der Mehr-

zahl von Schienenfahrzeugen von vorbestimmten Referenzwerten in Abhängigkeit der Wertungsparameter;

- Generieren eines optimierten Satzes der zeitlichen Steuerparameter, wobei eine Steuerung der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen gemäß dem optimierten Satz von zeitlichen Steuerparametern zu einem minimierten Energiebedarfswert der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen führt; und
- Bereitstellen des optimierten Satzes von zeitlichen Steuerparametern der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen.

[0006] Hierdurch kann der technische Vorteil erreicht werden, dass ein verbessertes Verfahren zum Optimieren eines Schienenverkehrs eines Schienenverkehrsnetzes mit einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen bereitgestellt werden kann, das insbesondere im Online-Betrieb des Schienenverkehrs eingerichtet ist, eine Optimierung bezüglich eines Energiebedarfswerts des Schienenverkehrsnetzes des Schienenverkehrs durchzuführen. Hierzu werden basierend auf Zustandsdaten der Schienenfahrzeuge für die Schienenfahrzeuge des Schienenverkehrsnetzes Zuverlässigkeitswerte ermittelt, die eine Wahrscheinlichkeit beschreiben, dass das jeweilige Schienenfahrzeug gemäß einer energieoptimierten Referenztrajektorie betreibbar ist. Basierend auf den Zuverlässigkeitswerten und den Zustandsdaten der Schienenfahrzeuge werden individuell angepasste Energietrajektorien der Schienenfahrzeuge ermittelt, die einen Energieverbrauch eines jeweiligen Schienenfahrzeugs für einen zu befahrenden Streckenabschnitt beschreiben. Unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeitswerte und der ermittelten Energietrajektorien wird durch Ausführung eines Optimierungsprozesses ein optimierter Satz von zeitlichen Steuerparametern der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen generiert, wobei eine Steuerung der Schienenfahrzeuge gemäß dem optimierten Satz von zeitlichen Steuerparametern zu einem minimierten Energiebedarfswert des Schienenverkehrs führt. Durch die Berücksichtigung der Zuverlässigkeitswerte ist sowohl eine präzisere Bestimmung der Energietrajektorien der einzelnen Schienenfahrzeuge und damit verbunden eine präzisere Ermittlung des Satzes von zeitlichen Steuerparametern ermöglicht. Hierdurch kann eine verbesserte Optimierung des Schienenverkehrs in Bezug auf den Energiebedarfswert des Schienenverkehrsnetzes erreicht werden.

[0007] Nach einer Ausführungsform umfassen die zeitlichen Steuerparameter Ankunftszeiten und/oder Abfahrtszeiten und/oder Standzeiten der Schienenfahrzeuge an Haltestellen des Verkehrsnetzes.

[0008] Hierdurch kann der technische Vorteil erreicht werden, dass eine präzise Optimierung des Schienenverkehrs durch die Variation der Ankunftszeiten und/oder Abfahrtszeiten und/oder Standzeiten der Schienenfahrzeuge an entsprechenden Haltestellen des Verkehrsnetzes bereitgestellt werden kann.

[0009] Nach einer Ausführungsform werden die Zuverlässigkeitswerte für Schienenfahrzeuge unter Berücksichtigung von Hindernissen der jeweiligen Schienenwege ermittelt.

[0010] Hierdurch kann der technische Vorteil erreicht werden, dass eine aktuelle Fahrsituation der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen in der Optimierung des Schienenverkehrs über die Zuverlässigkeitswerte berücksichtigt werden kann. Hindernisse in Schienenwegen führen hierbei zu Abweichungen der die jeweiligen Schienenwege befahrenden Schienenfahrzeuge von vorbestimmten Fahrt- bzw. Energietrajektorien. Durch Berücksichtigung derartiger Hindernisse bei der Ermittlung entsprechender Energietrajektorien bzw. eines entsprechenden Energiebedarfswerts des Schienenverkehrsnetzes kann eine präzisere Optimierung des Schienenverkehrs erreicht werden.

[0011] Nach einer Ausführungsform werden die zeitlichen Steuerparameter in Bezug auf einen Referenzwert variiert, wobei der Referenzwert in einem auf den Energiebedarfswert des Schienenverkehrsnetzes optimierten Fahrplan der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen definiert ist, und wobei die optimierte Referenztrajektorie im optimierten Fahrplan des Verkehrsnetzes definiert ist.

[0012] Hierdurch kann der technische Vorteil erreicht werden, dass eine präzise Optimierung des Schienenverkehrs in Bezug auf einen optimierten Fahrplan des Schienenverkehrsnetzes ermöglicht ist.

[0013] Nach einer Ausführungsform werden ausschließlich die zeitlichen Steuerparameter der Schienenfahrzeuge gegenüber dem Referenzwert variiert, deren Zuverlässigkeitswerte einen vorbestimmten Grenzwert erreichen oder überschreiten, und wobei die zeitlichen Steuerparameter der Schienenfahrzeuge, deren Zuverlässigkeitswerte den Grenzwert nicht erreichen, in dem Referenzwert fixiert werden.

[0014] Hierdurch kann der technische Vorteil erreicht werden, dass eine Beschleunigung des Optimierungsprozesses in Gestalt des Variierens der zeitlichen Steuerparameter und des Ermittlens des Energiebedarfswerts und des Generierens des optimierten Satzes von Steuerparametern erreicht werden kann. Indem ausschließlich die zeitlichen Steuerparameter der Schienenfahrzeuge gegenüber dem Referenzwert des optimierten Fahrplans variiert werden, deren Zuverlässigkeitswert einen vorbestimmten Grenzwert erreicht oder überschreitet, während die Schienenfahrzeuge, deren Zuverlässigkeitswerte den Grenzwert nicht erreichen, in die Ermittlung des Energiebedarfswerts des Schienenverkehrsnetzes ohne Variation der jeweiligen zeitlichen Steuerparameter eingehen, kann der jeweilige Optimierungsprozess zeitlich beschleunigt werden. Hierdurch kann das erfindungsgemäße Verfahren innerhalb eines vorbestimmten Zeitraums, beispielsweise von fünf Sekunden, durchgeführt werden, sodass im Online-Betrieb des Schienenverkehrsnetzes eine präzise und zuverlässige Optimierung des Schienenverkehrs und damit verbunden eine Annäherung des aktuellen Schienenverkehrs

an den vorbestimmten und optimierten Fahrplan erreicht werden kann.

[0015] Nach einer Ausführungsform werden die zeitlichen Steuerparameter gegenüber dem definierten Referenzwert innerhalb einer vorbestimmten maximalen Variation variiert, wobei die maximale Variation im optimierten Fahrplan definiert ist.

[0016] Hierdurch kann der technische Vorteil erreicht werden, dass bei der Optimierung des Schienenverkehrs äußere Randbedingungen eingehalten werden können. Indem die zeitlichen Steuerparameter, beispielsweise die Ankunftszeit und/oder die Abfahrtszeit und/oder die Standzeit der Schienenfahrzeuge an entsprechenden Haltestellen des Schienenverkehrsnetzes ausschließlich innerhalb der vorbestimmten maximalen Variation des optimierten Fahrplans variiert werden, kann ein gesicherter Ablauf des Schienenverkehrs bei dem Generieren des optimierten Satzes von Steuerparametern berücksichtigt werden. Beispielsweise kann durch Einhaltung der maximalen Variation verhindert werden, dass Standzeiten der Schienenfahrzeuge an entsprechenden Haltestellen derart drastisch verändert werden, dass ein sicheres und zügiges Ein- und Aussteigen der Passagiere gestört ist.

[0017] Nach einer Ausführungsform werden die Energietrajektorien in Abhängigkeit der Zuverlässigkeitswerte ermittelt, wobei für Schienenfahrzeuge mit Zuverlässigkeitswerten, die den Grenzwert erreichen oder überschreiten, Energietrajektorien ermittelt werden, die der Referenztrajektorie entsprechen, und wobei für Schienenfahrzeuge mit Zuverlässigkeitswerten, die nicht den Grenzwert erreichen, von der Referenztrajektorie abweichende Energietrajektorien ermittelt werden.

[0018] Hierdurch kann der technische Vorteil erreicht werden, dass eine präzise Ermittlung der Energietrajektorien der einzelnen Schienenfahrzeuge unter Berücksichtigung der tatsächlichen Fahrsituation und damit verbunden eine präzise Ermittlung des Energiebedarfswerts des Schienenverkehrs ermöglicht ist.

[0019] Nach einer Ausführungsform beschreiben die Energietrajektorien auf einen vorbestimmten Zeitabschnitt definierte zeitliche Energiebedarfswerte der Schienenfahrzeuge und umfassen jeweils wenigstens einen Energieentnahmewert und einen Energieeinspeisungswert, wobei der Energieentnahmewert eine Energiemenge beschreibt, die das jeweilige Schienenfahrzeug für eine Durchführung eines Beschleunigungsprozesses aus einem Versorgungsnetz des Schienenverkehrsnetzes entnimmt, und wobei der Energieeinspeisungswert eine Energiemenge beschreibt, die das jeweilige Schienenfahrzeug bei Durchführung eines Bremsvorgangs in das Versorgungsnetz einspeist.

[0020] Hierdurch kann der technische Vorteil erreicht werden, dass bei der Ermittlung des Energiebedarfswerts des Schienenverkehrs bzw. bei der Generierung des energieoptimierten Satzes von zeitlichen Steuerparametern sowohl die durch die Schienenfahrzeuge aus dem Versorgungsnetz des Schienenverkehrsnetzes ent-

nommene Energie wie auch die durch die Schienenfahrzeuge in das jeweilige Versorgungsnetz eingespeiste Energie berücksichtigt werden kann.

[0021] Nach einer Ausführungsform werden zum Ermitteln des Energiebedarfswerts für Energietrajektorien, die der Referenztrajektorie entsprechen, wenigstens ein Energieentnahmewert und wenigstens ein Energieeinspeisungswert der Referenztrajektorie berücksichtigt, wobei für von der Referenztrajektorie abweichende Energietrajektorien für den Energieentnahmewert wenigstens ein Maximalwert aus einer Kombination wenigstens eines Energieentnahmewerts der Referenztrajektorie und wenigstens eines Energieeinspeisungswerts der jeweiligen Energietrajektorie und für den Energieeinspeisungswert wenigstens ein Minimalwert aus einer Kombination wenigstens eines Energieeinspeisungswerts der Referenztrajektorie und wenigstens eines Energieeinspeisungswerts der Energietrajektorie berücksichtigt werden.

[0022] Hierdurch kann der technische Vorteil erreicht werden, dass eine präzise Bestimmung des Energiebedarfswerts und insbesondere eine präzise Ermittlung des energieoptimierten Satzes von Steuerparametern ermöglicht ist. Insbesondere bei Schienenfahrzeugen mit niedrigen Zuverlässigkeitswerten und entsprechenden Energietrajektorien, die von der im optimierten Fahrplan definierten Referenztrajektorie abweichen, können entsprechend pessimistische Einschätzungen der einzelnen Energieverbräuche der einzelnen Schienenfahrzeuge aufgestellt werden. Durch die pessimistischen Einschätzungen, die von einer maximalen Energieentnahme und einer minimalen Energieeinspeisung ausgehen, kann eine pessimistische Einschätzung des Energiebedarfswerts des Schienenverkehrs berücksichtigt werden, der von einer maximalen Energieentnahme durch die Schienenfahrzeuge und lediglich einer minimalen Einspeisung ausgeht. Durch die Berücksichtigung des derart pessimistisch eingeschätzten Energiebedarfswerts kann verhindert werden, dass beim tatsächlichen Betrieb der Schienenfahrzeuge ein höherer Energiebedarfswert auftritt, als dieser während des Optimierungsprozesses berücksichtigt wurde. Eine Überlastung des Versorgungsnetzes kann somit verhindert werden.

[0023] Nach einer Ausführungsform werden das Ermitteln der Zuverlässigkeitswerte, das Ermitteln der Energietrajektorien, das Ermitteln des Energiebedarfswerts und das Variieren der zeitlichen Steuerparameter rekursiv ausgeführt.

[0024] Hierdurch kann der technische Vorteil erreicht werden, dass ein leistungsfähiges Verfahren zum Optimieren eines Schienenverkehrs bereitgestellt werden kann.

[0025] Nach einer Ausführungsform umfasst der Energiebedarfswert des Schienenverkehrs einen Gesamtenergieverbrauch und/oder einen maximalen Energieverbrauch des Schienenverkehrs über einen vorbestimmten Zeitraum.

[0026] Hierdurch kann der technische Vorteil erreicht

werden, dass sowohl der Gesamtenergieverbrauch als auch ein maximaler Energieverbrauch in Form von Spannungsspitzen bei der Optimierung des Schienenverkehrs und insbesondere bei der Optimierung der zeitlichen Steuerparameter berücksichtigt werden kann.

[0027] Nach einer Ausführungsform wird das Ermitteln der Zuverlässigkeitswerte und/oder das Ermitteln der Energietrajektorien durch ein entsprechend trainiertes neuronales Netz ausgeführt, wobei das Variieren der zeitlichen Steuerparameter und das Generieren eines optimierten Satzes von zeitlichen Steuerparametern durch einen Optimierungsalgorithmus ausgeführt wird.

[0028] Hierdurch kann der technische Vorteil erreicht werden, dass durch das entsprechend trainierte neuronale Netz ein präzises Ermitteln der Zuverlässigkeitswerte und/oder ein präzises Ermitteln der Energietrajektorien ermöglicht ist. Durch das Verwenden des Optimierungsalgorithmus kann ein effizienter Optimierungsprozess in Form des Variierens der zeitlichen Steuerparameter und des Generierens des optimierten Stundensatzes von zeitlichen Steuerparametern erreicht werden.

[0029] Nach einer Ausführungsform wird das Verfahren in einem Online-Betrieb der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen im Schienenverkehr des Schienenverkehrsnetzes ausgeführt.

[0030] Hierdurch kann der technische Vorteil erreicht werden, dass eine Optimierung des Schienenverkehrs während des Online-Betriebs der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen ermöglicht ist.

[0031] Nach einem zweiten Aspekt der Erfindung wird ein System zum Optimieren eines Schienenverkehrs mit einer Recheneinheit bereitgestellt, die eingerichtet ist, das Verfahren zum Optimieren eines Schienenverkehrs eines Schienenverkehrsnetzes mit einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen nach einer der voranstehenden Ausführungsformen auszuführen.

[0032] Nach einem dritten Aspekt der Erfindung wird ein Computerprogrammprodukt umfassend Befehle bereitgestellt, die bei der Ausführung des Programms durch eine Datenverarbeitungseinheit diese veranlassen, das Verfahren zum Optimieren eines Schienenverkehrs eines Schienenverkehrsnetzes mit einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen nach einer der voranstehenden Ausführungsformen auszuführen.

[0033] Die oben beschriebenen Merkmale und Vorteile dieser Erfindung sowie die Art und Weise, wie diese erreicht werden, werden klarer und deutlicher verständlich durch die Erläuterungen der folgenden, stark vereinfachten, schematischen Darstellungen bevorzugter Ausführungsbeispiele. Hierbei zeigen jeweils:

FIG 1 eine schematische Darstellung eines Systems zur Optimierung eines Schienenverkehrs gemäß einer Ausführungsform;

FIG 2 eine schematische Abbildung eines Schienenverkehrsnetzes gemäß einer Ausführungsform;

- FIG 3 eine schematische Darstellung einer Energietrajektorie gemäß einer Ausführungsform;
- FIG 4 eine weitere schematische Darstellung einer Energietrajektorie gemäß einer weiteren Ausführungsform;
- FIG 5 eine weitere schematische Darstellung einer Energietrajektorie gemäß einer weiteren Ausführungsform;
- FIG 6 eine weitere schematische Darstellung einer Energietrajektorie gemäß einer weiteren Ausführungsform;
- FIG 7 eine schematische Darstellung eines Optimierungsprozesses zum Generieren eines optimierten Satzes von zeitlichen Steuerparametern einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen gemäß einer Ausführungsform;
- FIG 8 eine schematische Darstellung des Verfahrens zur Optimierung eines Schienenverkehrs eines Schienenverkehrsnetzes gemäß einer Ausführungsform;
- FIG 9 eine weitere schematische Darstellung des Systems zur Optimierung eines Schienenverkehrs gemäß einer Ausführungsform; und
- FIG 10 eine schematische Darstellung eines Computerprogrammprodukts.

[0034] FIG 1 zeigt eine schematische Darstellung eines Systems 300 zur Optimierung eines Schienenverkehrs gemäß einer Ausführungsform.

[0035] Ein System 300 zur Optimierung eines Schienenverkehrs umfasst gemäß der gezeigten Ausführungsform eine Mehrzahl von Modulen, die auf einer Recheneinheit 301 ausführbar sind. Das System 300 kann ferner in ein Offline-Teilsystem 302 und ein Online-Teilsystem 304 aufgeteilt sein, wobei das Offline-Teilsystem 302 offline, sprich unabhängig von einem Betrieb der Schienenfahrzeuge 203, ausgeführt wird, während das Online-Teilsystem 304 während des Betriebs der Schienenfahrzeuge 203 ausgeführt wird.

[0036] Die zentrale Komponente des Offline-Teilsystems 302 ist ein Fahrplanoptimierungsmodul 311. Das Fahrplanoptimierungsmodul 311 dient dazu, für einen vorbestimmten Zeitraum einen optimierten Fahrplan für einen Schienenverkehr einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen eines Schienenverkehrsnetzes zu erstellen. Den im Offline-Teilsystem 302 erstellten optimierten Fahrplan kann das Fahrplanoptimierungsmodul 311 über eine erste Schnittstelle an das Online-Teilsystem 304 übertragen, damit der Fahrplan zur Steuerung des Schienenverkehrs ausgeführt werden kann.

[0037] Im tatsächlichen Betrieb des Schienenverkehrs

wird der von nun an Online-Fahrplan genannte Fahrplan durch ein Fahrplanmanagementmodul 305 verwaltet. Hierzu können Positionsdaten einzelner Schienenfahrzeuge des Schienenverkehrs über ein automatisches Schienenfahrzeugverfolgungsmodul 307 über eine zweite Schnittstelle S2 an das Fahrplanmanagementmodul 305 übertragen werden, damit dieses einen Vergleich zwischen Soll-Bewegungen des Fahrplans und tatsächlich durch die Schienenfahrzeuge des Schienenverkehrs ausgeführte Ist-Bewegungen ausführen kann.

[0038] Das Fahrplanmanagementmodul 305 kann über eine dritte Schnittstelle S3 Befehle zur Auswahl entsprechend zu befahrender Schienenwege an ein automatisches Streckenauswahlmodul 309 übertragen. Somit können rechtzeitig entsprechende Schienenwege reserviert werden, um einen Betrieb der Schienenfahrzeuge mit minimalen Verspätungen zu gewährleisten.

[0039] Das Fahrplanmanagementmodul 305 weist ferner eine bidirektionale Schnittstelle S2, S4 mit einem automatischen Schienenfahrzeugregelungsmodul 303 auf. Für den Fall, dass der Online-Fahrplan geändert werden muss, entweder durch einen neuen Sollfahrplan des Fahrplanoptimierungsmoduls 311 oder durch Änderungen eines Fahrdienstleiters, kann das automatische Schienenfahrzeugregelungsmodul 303 entsprechend informiert werden, um eine Änderung des Online-Fahrplans zu bewirken. Hierzu benötigt das automatische Schienenfahrzeugregelungsmodul 303 ferner aktuelle Positionsdaten der Schienenfahrzeuge, um aktuelle Verspätungen der Schienenfahrzeuge ermitteln und bei größeren Abweichungen geeignete Regelungen einleiten zu können.

[0040] Diese Regelungen können entsprechende durch die Schienenfahrzeuge auszuführende Steuerungsaktionen umfassen, mit denen gewünschte bzw. zur Aufhebung der Verspätung und zur Änderung des Fahrplans durch die Schienenfahrzeuge zu erreichende bzw. einzuhaltende Abfahrtszeiten und/oder Ankunftszeiten und Haltezeiten der Schienenfahrzeuge an Haltestellen der Schienenwege des Schienenverkehrsnetzes umfassen. Die entsprechenden Regelungen und/oder Steuerungsaktionen können über eine fünfte Schnittstelle S5 an das Fahrplanmanagementmodul 305 übermittelt werden.

[0041] Abschließend werden zur Anpassung des Fahrplans die entsprechenden Regelungen und Steuerungsaktionen und die entsprechenden optimierten Ankunftszeiten/Abfahrtszeiten/Haltezeiten vom automatischen Fahrplanmanagementmodul 305 über eine sechste Schnittstelle S6 an automatische Schienenfahrzeugsteuerungsmodul 313 der einzelnen Schienenfahrzeuge 315 des Schienenverkehrs übermittelt, damit diese die gewünschten Änderung bzw. Steuerungsaktionen ausführen können, um die optimierten Ankunftszeiten/Abfahrtszeiten/Haltezeiten zu erreichen oder einzuhalten.

[0042] Im Falle von automatisch fahrenden Schienenfahrzeugen kann das automatische Schienenfahrzeug-

steuerungsmodul 313 energieoptimierte Fahrtrajektorien des Schienenfahrzeugs 203 ermitteln, die am besten zum aktuellen Online-Fahrplan passen. Im Falle des manuellen Fahrens wird der Fahrzeugführer beraten, ist aber in der Umsetzung der Regelungen frei.

[0043] In der gezeigten Ausführungsform ist das automatische Schienenfahrzeugregelungsmodul 303 eingerichtet, basierend auf den Zustandsdaten eines zu optimierenden Schienenverkehrs einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen das erfindungsgemäße Verfahren zum Optimieren eines Schienenverkehrs einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen eines Schienenverkehrsnetzes auszuführen.

[0044] FIG 2 zeigt eine schematische Abbildung eines Schienenverkehrsnetzes 200 gemäß einer Ausführungsform.

[0045] In FIG 2 ist das Schienenverkehrsnetz 200 in zwei Subnetze 202 aufgeteilt, die jeweils Schienenfahrzeuge umfassen. Das linke Subnetz 202 umfasst hierbei ein erstes Schienenfahrzeug 204, ein zweites Schienenfahrzeug 205, ein drittes Schienenfahrzeug 206 und ein viertes Schienenfahrzeug 207, die jeweils auf entgegengesetzt gerichteten Schienenwegen 201 verfahren werden. Das rechte Subnetz 202 weist ferner ein fünftes Schienenfahrzeug 208 auf.

[0046] Gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren wird zum Optimieren des Schienenverkehrs des Schienenverkehrsnetzes 200 für jedes Schienenfahrzeug ein Zuverlässigkeitswert W ermittelt, der einer Wahrscheinlichkeit entspricht, dass das jeweilige Schienenfahrzeug 203 gemäß einer vordefinierten Referenztrajektorie verfahren werden kann. Die Referenztrajektorie beschreibt hierbei eine Energietrajektorie des jeweiligen Schienenfahrzeugs 203, die einen zeitlichen Energieverbrauch des jeweiligen Schienenfahrzeugs beim Befahren des jeweiligen Schienenwegs 201 definiert.

[0047] Die jeweiligen Zuverlässigkeitswerte W der einzelnen Schienenfahrzeuge 203 können hierbei von Hindernissen abhängen, die in den jeweiligen Schienenwegen 201 angeordnet sind und die entsprechenden Schienenfahrzeuge 203 zu einem Abweichen von der jeweils vordefinierten Referenztrajektorie veranlassen, indem die jeweiligen Schienenfahrzeuge aufgrund der Hindernisse mit einer geringeren Geschwindigkeit fahren müssen bzw. gegebenenfalls unplanmäßig die Fahrt unterbrechen müssen.

[0048] In der gezeigten Ausführungsform wird für das Berücksichtigen der Hindernisse unter anderem ein Abstand d zu einem vorherfahrenden weiteren Schienenfahrzeug berücksichtigt, wobei ein Abstand d , der geringer als ein vordefinierter Mindestabstand $d_{\min}$ ausfällt, als eine Behinderung des hinteren Schienenfahrzeugs angesehen wird.

[0049] Zum Bestimmen der jeweiligen Zuverlässigkeitswerte W der einzelnen Schienenfahrzeuge 203 werden zunächst Zustandsdaten der Schienenfahrzeuge 203 interpretiert. Die Zustandsdaten der Schienenfahrzeuge beschreiben hierbei Zustände, in denen sich die

einzelnen Schienenfahrzeuge 203 innerhalb des Schienenverkehrs befinden und umfassen wenigstens Positionsdaten der Schienenfahrzeuge 203, über die eine eindeutige Positionierung der Schienenfahrzeuge 203 im Schienenverkehrsnetz 200 ermöglicht ist. Basierend auf den Zustandsdaten werden den einzelnen Schienenfahrzeugen 203 entsprechende Zuverlässigkeitswerte W zugeordnet.

[0050] In der gezeigten Ausführungsform sind die Zuverlässigkeitswerte W in einer binären Schreibweise formuliert und weisen jeweils entweder den Zahlenwert 1 oder den Zahlenwert 0 auf. Schienenfahrzeuge mit einem Zuverlässigkeitswert $W = 1$ sind hierbei in der Lage, gemäß der vordefinierten Referenztrajektorie RT angesteuert zu werden, während Schienenfahrzeuge mit einem Zuverlässigkeitswert $W = 0$ gegebenenfalls aufgrund entsprechender Hindernisse im jeweiligen Schienenweg 201 nicht in der Lage sind, gemäß der vordefinierten Referenztrajektorie RT angesteuert zu werden. Alternativ zu der gezeigten Ausführungsform können die Zuverlässigkeitswerte W einen beliebigen Zahlenwert zwischen einem definierten Minimalwert und einem definierten Maximalwert annehmen. Der definierte Minimalwert kann hierbei auf den Zahlenwert 0 festgelegt sein, während der definierte Maximalwert auf den Zahlenwert 1 festgelegt sein kann.

[0051] In der gezeigten Ausführungsform sind dem ersten Schienenfahrzeug 204, dem dritten Schienenfahrzeug 206, dem vierten Schienenfahrzeug 207 und dem fünften Schienenfahrzeug 208 die Zuverlässigkeitswerte $W = 1$ zugeordnet, wodurch ausgedrückt ist, dass diese gemäß der vordefinierten Referenztrajektorie RT angesteuert werden können. Schienenfahrzeuge 203, die gemäß der Referenztrajektorie RT angesteuert werden können, können hierbei gemäß einem vordefinierten und optimierten Fahrplan, der durch das Fahrplanoptimierungsmodul 311 offline erstellt wurde, betrieben werden. Dem zweiten Schienenfahrzeug 205 ist hingegen ein Zuverlässigkeitswert $W = 0$ zugeordnet, der besagt, dass das zweite Schienenfahrzeug 205 nicht gemäß dem optimierten Fahrplan und der darin definierten Referenztrajektorie betrieben werden kann. In dem gezeigten Beispiel ist das erste Schienenfahrzeug 204 mit einem Abstand d auf dem gleichen Schienenweg 201 in Fahrtrichtung R vor dem zweiten Schienenfahrzeug 205 angeordnet. In dem gezeigten Beispiel ist der Abstand d geringer als ein vordefinierter Mindestabstand $d_{\min}$, sodass das erste Schienenfahrzeug 204 als ein Hindernis für das zweite Schienenfahrzeug 205 interpretiert wird, das das zweite Schienenfahrzeug 205 davon abhält, gemäß der Referenztrajektorie RT angesteuert zu werden. Durch das erste Schienenfahrzeug 204 kann somit das zweite Schienenfahrzeug 205 nicht wie vordefiniert verfahren werden, sondern muss gegebenenfalls aufgrund des vorausfahrenden Fahrzeugs abbremsen bzw. anhalten, wodurch der vordefinierte und optimierte Fahrplan gestört wird.

[0052] Alternativ zu den vorausfahrenden Fahrzeu-

gen, die eine vordefinierte Steuerung der hinteren Schienenfahrzeuge 203 beeinträchtigen, können zusätzlich oder alternativ Baustellen bzw. temporäre Sperrungen einzelner Streckenabschnitte als Hindernisse identifiziert werden und die entsprechenden Zuverlässigkeitswerte W der jeweiligen Schienenfahrzeuge 203 beeinflussen.

[0053] FIG 3 zeigt eine schematische Darstellung einer Energietrajektorie ET gemäß einer Ausführungsform.

[0054] FIG 3 zeigt eine Energietrajektorie ET eines Schienenfahrzeugs 203, die einen zeitlichen Verlauf eines Energieverbrauchs des jeweiligen Schienenfahrzeugs beim Verfahren des Fahrzeugs entlang eines vordefinierten Schienenwegs 201 beschreibt. Die Energietrajektorie ET in Diagramm a) umfasst einen Energieentnahmewert ET1 (Diagramm b) und einen Energieeinspeisungswert ET2 (Diagramm c). Der Energieentnahmewert ET1 beschreibt einen Energiewert, den das jeweilige Schienenfahrzeug aufgrund eines Beschleunigungsvorgangs aus einem Versorgungsnetz des Schienenverkehrsnetzes 200 bezieht. Der Energieeinspeisungswert ET2 beschreibt hingegen einen Energiewert, den das jeweilige Schienenfahrzeug 203 aufgrund eines Bremsvorgangs in das Versorgungsnetz einspeist. Die in FIG 3 gezeigte Energietrajektorie ET ist lediglich beispielhafter Natur und stellt eine ideale Energietrajektorie ET dar, bei der Verlustdefekte unberücksichtigt bleiben und bei der die zum Beschleunigen des Schienenfahrzeugs entnommene Energie der durch den Bremsprozess in das Versorgungsnetz zurückgespeiste Energie entspricht. Reale Energietrajektorien können somit substantiell von der gezeigten Energietrajektorie ET abweichen, indem die Verläufe wie auch die Energiebeiträge der Energieentnahmewerte ET1 und der Energieeinspeisungswerte ET2 relativ zu dem hier gezeigten Beispiel variieren. Darüber hinaus können Energietrajektorien mehrere Energieentnahmewerte ET1 und mehrere Energieeinspeisungswerte ET2 aufgrund mehrerer Beschleunigungs- und Bremsprozesse aufweisen.

[0055] FIG 4 zeigt eine weitere schematische Darstellung einer Energietrajektorie ET gemäß einer weiteren Ausführungsform.

[0056] FIG 4 zeigt eine weitere graphische Darstellung einer Energietrajektorie ET und einer zusätzlichen Referenztrajektorie RT. Die Referenztrajektorie RT beschreibt hierbei einen vordefinierten optimierten Steuerungsprozess eines Schienenfahrzeugs und ist gemäß dem vordefinierten optimierten Fahrplan als angestrebter Richtwert für das Ansteuern des Schienenfahrzeugs entlang eines entsprechenden Schienenwegs definiert.

[0057] In FIG 4 weist die Energietrajektorie ET, die eine tatsächliche Energietrajektorie eines Schienenfahrzeugs darstellt, gemäß der das jeweilige Schienenfahrzeug angesteuert wird, und die von der Referenztrajektorie RT durch eine erste Abweichung U1 abweicht. Die in FIG 4 gezeigte erste Abweichung U1 entspricht einer Abweichung gemäß der Standzeit des jeweiligen Schie-

nenfahrzeugs. In der gezeigten Ausführungsform weist das gemäß der gezeigten Energietrajektorie ET angesteuerte Schienenfahrzeug eine gegenüber der Referenztrajektorie RT des optimierten Fahrplans verlängerte Standzeit des jeweiligen Schienenfahrzeugs an einer entsprechenden Haltstelle und eine damit verbundene verspätete Abfahrtszeit und Ankunftszeit an einer Zielhaltstelle auf, was im Diagramm a) der FIG 4 durch eine zeitliche Verschiebung der Energietrajektorie ET relativ zur Referenztrajektorie RT angedeutet ist. Hierdurch wird eine Abweichung des Schienenverkehrs zum jeweiligen optimierten Fahrplan bewirkt.

[0058] Die gezeigte Energietrajektorie ET beschreibt eine Energietrajektorie eines Schienenfahrzeugs 203 mit einem Zuverlässigkeitswert W, der entweder gemäß der Ausführungsform in FIG 2 den Zahlenwert 0 annimmt oder aber einen vorbestimmten Grenzwert nicht erreicht. Der Zuverlässigkeitswert W beschreibt hierbei nicht nur die Abweichung der jeweiligen Energietrajektorie ET von der vorbestimmten optimierten Referenztrajektorie RT, sondern drückt darüber hinaus eine Unsicherheit bezüglich der Vorhersage der tatsächlich durch das jeweilige Schienenfahrzeug 203 im Betrieb ausgeführten Energietrajektorie aus. Zur Berücksichtigung dieser Unsicherheit, bei der die tatsächlich ausgeführte Energietrajektorie von der durch das erfindungsgemäße Verfahren vorhergesagten Energietrajektorie ET abweichen kann, wird hierbei durch eine entsprechende pessimistische Einschätzung des Energieverbrauchs des jeweiligen Schienenfahrzeugs 203 berücksichtigt.

[0059] Die pessimistische Einschätzung des Energieverbrauchs ist hierbei durch eine maximale Energieentnahme in Form eines maximalen Energieentnahmewerts ET1 und eine minimale Energieeinspeisung in Form eines minimalen Energieeinspeisungswerts ET2 gekennzeichnet. Die pessimistische Einschätzung des Energieverbrauchs eines Schienenfahrzeugs 203 beschreibt hierbei eine für den Energiebedarfswert des Schienenverkehrs des Schienenverkehrsnetzes 200 ungünstige Einschätzung des Energieverbrauchs des jeweiligen Schienenfahrzeugs 203. In der gezeigten Ausführungsform ist der maximale Energieentnahmewert ET1 als eine Vereinigungsmenge der Energieentnahmewerte ET1 der Referenztrajektorie RT und der Energietrajektorie ET in Diagramm a) definiert. Der minimale Energieeinspeisungswert ET2 ist hingegen als eine Schnittmenge der Energieeinspeisungswerte ET2 der Referenztrajektorie RT und der Energietrajektorie ET definiert.

[0060] FIG 5 zeigt eine weitere schematische Darstellung einer Energietrajektorie ET gemäß einer weiteren Ausführungsform.

[0061] In FIG 5 ist eine weitere von der Referenztrajektorie RT abweichende Energietrajektorie ET dargestellt. In der gezeigten Ausführungsform weicht die Energietrajektorie ET um eine zweite Abweichung U2 von der Referenztrajektorie RT ab. In der gezeigten Ausführungsform beschreibt die zweite Abweichung U2 eine Abweichung in der Ankunftszeit des jeweiligen Schienen-

fahrzeugs an einer entsprechenden Haltestelle und eine damit verbundene verkürzte Fahrtzeit des Schienenfahrzeugs zwischen den zwei Haltestellen. Um die verkürzte Fahrtzeit und die zeitlich frühere Ankunftszeit zu realisieren, weist die Energietrajektorie ET eine erhöhte Beschleunigung des jeweiligen Schienenfahrzeugs und eine erhöhte Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs gegenüber der Referenztrajektorie RT auf. Hierdurch weist die Energietrajektorie ET einen erhöhten Energieentnahmewert ET1 und einen erhöhten Energieeinspeisungswert ET2 auf.

[0062] Gemäß der Ausführungsform in FIG 4 ist in den Diagrammen b) und c) eine entsprechend pessimistische Einschätzung des Energieverbrauchs des jeweiligen Schienenfahrzeugs dargestellt. Hierzu wird analog zu FIG 4 ein maximaler Energieentnahmewert ET1 als eine Vereinigungsmenge der Energieentnahmewerte ET1 der Referenztrajektorie RT und der Energietrajektorie ET beschrieben. Ferner ist in Diagramm c) ein minimaler Energieeinspeisungswert ET2 als eine Schnittmenge zwischen den Energieeinspeisungswerten ET2 der Referenztrajektorie RT und der Energietrajektorie ET gezeigt.

[0063] FIG 6 zeigt eine weitere schematische Darstellung einer Energietrajektorie ET gemäß einer weiteren Ausführungsform.

[0064] FIG 6 zeigt eine weitere Ausführungsform einer von der Referenztrajektorie RT abweichenden Energietrajektorie ET. In FIG 6 sind zwei von der Referenztrajektorie RT abweichende Energietrajektorien ET gezeigt. Beide Energietrajektorien ET weisen jeweils eine erste Abweichung U1 und eine zweite Abweichung U2 auf, die analog zu den Ausführungsformen in FIG 4 und FIG 5 eine Abweichung der Standzeit und eine Abweichung der Ankunftszeit des jeweiligen Schienenfahrzeugs darstellen. In den Diagrammen b) und c) ist jeweils die pessimistische Einschätzung des Energieverbrauchs E des jeweiligen Schienenfahrzeugs in Form eines maximalen Energieentnahmewerts ET1 und eines minimalen Energieeinspeisungswerts ET2 gezeigt, wobei der maximale Energieentnahmewert ET1 analog den zuvor beschriebenen Ausführungsformen als eine Vereinigungsmenge der Energieentnahmewerte ET1 der Referenztrajektorie RT und der Energietrajektorie ET und der minimale Energieeinspeisungswert ET2 als eine Schnittmenge der Energieeinspeisungswerte ET2 der Referenztrajektorie RT und der Energietrajektorie ET definiert sind.

[0065] FIG 7 zeigt eine schematische Darstellung eines Optimierungsprozesses zum Generieren eines optimierten Satzes P von zeitlichen Steuerparametern P1, P2, P3, P4 einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen 203.

[0066] FIG 7 zeigt eine graphische Darstellung eines Optimierungsprozesses zum Generieren eines optimierten Satzes P von zeitlichen Steuerparametern P1, P2, P3, P4, wobei der optimierte Satz P von zeitlichen Steuerparametern P1, P2, P3, P4 auf einen Energiebedarfswert GE des Schienenverkehrs des Schienenverkehrsnetzes 200 optimiert ist. Der gezeigte Optimierungspro-

zess kann gemäß eines Optimierungsalgorithmus OPT, beispielsweise gemäß eines Greedy Optimizers durchgeführt werden.

[0067] Zum Generieren des optimierten Satzes P von zeitlichen Steuerparametern P1, P2, P3, P4 werden die zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 für die Schienenfahrzeuge 203 gegenüber vordefinierten Referenzwerten PR des optimierten Fahrplans variiert und entsprechende Werte des Energiebedarfswerts GE des Schienenverkehrs der Mehrzahl der Schienenfahrzeuge 203 ermittelt. Die Gesamtheit von derart ermittelten zeitlichen Steuerparametern P1, P2, P3, P4, die zu einem minimalen Energiebedarfswert GE des Schienenverkehrs der Gesamtheit der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen 203 führt, wird als optimierter Satz P von zeitlichen Steuerparametern P1, P2, P3, P4 zusammengefasst.

[0068] FIG 7 zeigt ein Zahlenbeispiel basierend auf den ersten bis vierten Schienenfahrzeugen 204, 205, 206, 207 des Ausführungsbeispiels in FIG 2. Die in FIG 7 gezeigten Zahlenbeispiele dienen lediglich zu illustrativen Zwecken und stellen keine tatsächlichen Energiewerte bzw. zeitlichen Steuerparameter dar.

[0069] Die zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 können beispielsweise Ankunftszeiten, Standzeiten oder Abfahrtszeiten der einzelnen Schienenfahrzeuge 204, 205, 206, 207 an verschiedenen Haltestellen des Schienenverkehrsnetzes 200 sein. Durch Variation der einzelnen zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 gegenüber einem vordefinierten Referenzwert PR, der im optimierten Fahrplan definiert ist, kann der Schienenverkehr bzw. das Ansteuern der einzelnen Schienenfahrzeuge 204, 205, 206, 207 derart variiert werden, dass ein Gesamtenergiebedarfswert des Schienenverkehrs der Gesamtheit der Schienenfahrzeuge minimiert ist.

[0070] Hierzu können beispielsweise die Standzeiten der einzelnen Schienenfahrzeugen 203 an verschiedenen Haltestellen im Schienenverkehrsnetz derart variiert bzw. aufeinander angepasst werden, dass ein Betrieb der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen zu einem minimalen Energiebedarfswert GE führt. Beispielsweise kann so vermieden werden, dass eine Mehrzahl von Schienenfahrzeugen zeitgleich von einer Haltestelle abfahren, wodurch aufgrund der zeitgleichen Entnahmen der zur Beschleunigung der Schienenfahrzeuge benötigten Energie eine Belastung für das Versorgungsnetz entstehen kann. Analog können die Ankunfts- bzw. Abfahrtszeiten der Schienenfahrzeuge an Haltestellen derart aufeinander angepasst werden.

[0071] Der folgende gezeigte Optimierungsprozess des erfindungsgemäßen Verfahrens 100 wird für einen vorbestimmten Zeitabschnitt durchgeführt, währenddessen die verschiedenen Schienenfahrzeuge 203 entlang entsprechender Schienenwege 201 des Schienenverkehrsnetzes 200 verfahren werden. Während dieses vorbestimmten Zeitabschnitts fahren die verschiedenen Schienenfahrzeuge 203 unterschiedliche Haltestellen an, für die gegebenenfalls verschiedene zeitliche Steu-

erparameter in Form der jeweiligen Referenzwerte PR im optimierten Fahrplan definiert sind. Der optimierte Fahrplan umfasst somit für jedes Schienenfahrzeug bzw. für jede Fahrstrecke innerhalb des Schienenverkehrsnetzes 200 und die darin enthaltenen Haltestellen entsprechende Ankunfts- und Abfahrts- bzw. Haltezeiten der die jeweilige Fahrstrecke befahrenden Schienenfahrzeuge 203.

[0072] Die dargestellte Optimierung kann in einem Onlinemodus durchgeführt werden, sprich während des Verfahrens der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen zwischen der Mehrzahl von Haltestellen innerhalb des Schienenverkehrsnetzes. Die Optimierung kann somit zyklisch durchgeführt werden und einen vorbestimmten Zeitabschnitt umfassen. Entsprechend optimierte zeitliche Steuerparameter beziehen sich hierbei auf Haltestellen, die durch die jeweiligen Schienenfahrzeuge während des vorbestimmten Zeitabschnitts angesteuert beziehungsweise verlassen werden. Die berechneten bzw. ermittelten Energietrajektorien ET wie auch die Referenztrajektorien RT beziehen sich ebenfalls in ihrer zeitlichen Ausdehnung auf den entsprechend vordefinierten Zeitabschnitt.

[0073] Im gezeigten Ausführungsbeispiel ist eine Optimierung eines Schienenverkehrs und ein Generieren eines optimierten Satzes P von zeitlichen Steuerparametern für die ersten bis vierten Schienenfahrzeuge 204, 205, 206, 207 des linken Subnetzes 202 in FIG 2 dargestellt.

[0074] Ausgehend von einem Satz von Referenzwerten PR der zeitlichen Steuerparameter, die im optimierten Fahrplan und die für die jeweiligen Haltestellen bzw. die jeweiligen Schienenfahrzeuge entsprechende Ankunftszeiten und/oder Haltezeiten und/oder Abfahrtszeiten definiert sind, wird ein Energiebedarfswert GE als eine Summe der Energieverbräuche der vier betrachteten Schienenfahrzeuge 204, 205, 206, 207 generiert. Der Energiebedarfswert GE wird hierbei durch ein Aufsummieren der jeweils für die einzelnen Schienenfahrzeuge 204, 205, 206, 207 berechneten Energietrajektorien ET und die darin definierten Energieentnahmewerte ET1 bzw. Energieeinspeisungswerte ET2 berechnet. In Abhängigkeit der Zuverlässigkeitswerte W der einzelnen Schienenfahrzeuge 203 für die jeweils betrachteten Fahrstrecken werden die Schienenfahrzeuge entweder in Form der vordefinierten Referenztrajektorien RT für die jeweiligen Fahrstrecken oder durch die eigens ermittelten Energietrajektorien der jeweiligen Schienenfahrzeuge für die jeweiligen Fahrstrecken berücksichtigt.

[0075] In dem gezeigten Zahlenbeispiel entspricht der Energiebedarfswert GE des Schienenverkehrs bestehend aus den vier Schienenfahrzeugen 204, 205, 206, 207 für die im optimierten Fahrplan definierten Referenzwerte PR dem Zahlenwert $GE = 8$. Der hier angegebene Zahlenwert ist lediglich beispielhaft und beschreibt keine reale Energiesituation eines realen Schienenverkehrs.

[0076] In einem ersten Optimierungsschritt wird für das erste Schienenfahrzeug 204 der jeweilige zeitliche Steu-

erparameter P1 um den vordefinierten Referenzwert PR variiert. Im gezeigten Zahlenbeispiel wird hierzu der vordefinierte Referenzwert PR um einen Zahlenwert 10 erhöht bzw. verringert. Beispielsweise wird die Standzeit des ersten Schienenfahrzeugs 204 für eine entsprechende Haltestelle gegenüber der im optimierten Fahrplan für die jeweilige Haltestelle vorgesehene Standzeit verkürzt oder verlängert. Die in Fig. 7 gezeigten Zahlenwerte sind auch in diesem Fall lediglich beispielhaft und dienen nur zur Illustration des Variierens der einzelnen zeitlichen Steuerparameter. Für jede Variation des zeitlichen Steuerparameters P1 des ersten Schienenfahrzeugs 204 wird entsprechend ein Energiebedarfswert GE des die vier Schienenfahrzeuge 204, 205, 206, 207 umfassenden Schienenverkehrs errechnet. Zur Optimierung des Satzes von zeitlichen Steuerparametern P1, P2, P3, P4 wird hierbei für das erste Schienenfahrzeug 204 der zeitliche Steuerparameter P1 gewählt, der zu einem Energiebedarfswert GE führt, der geringer ist als der Energiebedarfswert GE, der für die vordefinierten Referenzwerte PR errechnet wurde.

[0077] Analog zu dem zum ersten Schienenfahrzeug 204 beschriebenen Optimierungsschritt wird eine Variation der Steuerparameter P1, P2, P3, P4 für die weiteren Schienenfahrzeuge 205, 206, 207 durchgeführt, entsprechende Energiebedarfswerte GE des gesamten Schienenverkehrs errechnet und die zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 ausgewählt, die zu einem Minimum des Energiebedarfswerts GE führen. Das Vorgehen hierbei entspricht einem aus dem Stand der Technik bekannten Optimierungsalgorithmus.

[0078] Abweichend von diesem standardisierten Vorgehen wird jedoch für die Schienenfahrzeuge 203, die einen Zuverlässigkeitswert W aufweisen, der einen vorbestimmten Grenzwert weder erreicht noch überschreitet, keine Variation der zeitlichen Steuerparameter durchgeführt, sondern es werden ausschließlich die jeweiligen Referenzwerte PR berücksichtigt. In dem gezeigten Ausführungsbeispiel weist das zweite Schienenfahrzeug 205 einen Zuverlässigkeitswert $W = 0$ auf, der in der gezeigten binären Ausführung des Zuverlässigkeitswerts W somit den jeweiligen Grenzwert von $W = 1$ nicht erreicht oder überschreitet. In dem dargestellten Optimierungsprozess wird somit keine Variation des zeitlichen Steuerparameters P2 des zweiten Schienenfahrzeugs 205 durchgeführt, sondern der zeitliche Steuerparameter P2 wird auf den im optimierten Fahrplan definierten Referenzwert PR fixiert.

[0079] Der gemäß dem oben beschriebenen Optimierungsprozess generierte optimierte Satz P von zeitlichen Steuerparametern umfasst hierbei die variierten bzw. auf den Referenzwert PR fixierten zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4, die im Optimierungsprozess zu einem minimalen Energiebedarfswert GE des Schienenverkehrs der Gesamtheit der hier betrachteten vier Schienenfahrzeuge 204, 205, 206, 207 geführt haben. Eine Ansteuerung des Schienenverkehrs bzw. der vier hier betrachteten Schienenfahrzeuge 204, 205, 206, 207 ge-

mäß dem optimierten Satz P der zeitlichen Steuerparameter kann hierbei zu einem minimierten Energiebedarfswert GE des Schienenverkehrs der Gesamtheit der vier betrachteten Schienenfahrzeuge 204, 205, 206, 207 für einen vorbestimmten Zeitabschnitt führen.

[0080] Der optimierte Satz P von zeitlichen Steuerparametern beschreibt hierbei eine zeitliche Ansteuerung der vier betrachteten Schienenfahrzeuge 204, 205, 206, 207 und berücksichtigt in der hier beschriebenen Ausführungsform eine zeitliche Ansteuerung der genannten Schienenfahrzeuge für wenigstens eine innerhalb des vordefinierten Zeitraums durch die jeweiligen Schienenfahrzeuge 204, 205, 206, 207 anzusteuern Haltestelle.

[0081] Der hier gezeigte Optimierungsprozess des erfindungsgemäßen Verfahrens 100 zum Optimieren eines Schienenverkehrs kann somit während des Online-Betriebs des Schienenverkehrs durchgeführt werden und kann insbesondere wiederholt für eine beliebige Anzahl aufeinanderfolgender Zeiträume, beispielsweise für das Erreichen einer beliebigen Anzahl von Haltestellen durch die jeweiligen Schienenfahrzeuge 203 durchgeführt werden.

[0082] Durch die Vorauswahl der im Optimierungsprozess zu variierenden zeitlichen Steuerparameter durch die jeweilige Berücksichtigung der Zuverlässigkeitswerte W der einzelnen Schienenfahrzeuge 203, bei der lediglich die zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 der Schienenfahrzeuge 203 variiert werden, deren Zuverlässigkeitswerte W den vorbestimmten Grenzwert erreichen oder überschreiten, und für die somit eine Ansteuerung gemäß der vordefinierten Referenztrajektorie RT gesichert vorhergesagt werden kann, kann der wie oben beschriebene Optimierungsprozess vereinfacht und beschleunigt werden. Hierdurch kann erreicht werden, dass das erfindungsgemäße Verfahren im Online-Betrieb durchgeführt und innerhalb eines vorbestimmten Zeitfensters, beispielsweise von fünf Sekunden, zu einem gesicherten Ergebnis, in Form des optimierten Satzes P von zeitlichen Steuerparametern geführt werden kann.

[0083] FIG 8 zeigt eine schematische Darstellung des Verfahrens 100 zur Optimierung eines Schienenverkehrs eines Schienenverkehrsnetzes 200 gemäß einer Ausführungsform.

[0084] Zum Optimieren des Schienenverkehrs eines Schienenverkehrsnetzes 200 einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen 203 werden zunächst in einem ersten Verfahrensschritt 101 für eine Mehrzahl der Schienenfahrzeuge 203 basierend auf Zustandsdaten der Schienenfahrzeuge 203 entsprechende Zuverlässigkeitswerte W bestimmt, die eine Wahrscheinlichkeit ausdrücken, dass das jeweilige Schienenfahrzeug 203 gemäß einer in einem energieoptimierten Fahrplan definierten Referenztrajektorie RT ansteuerbar ist. Die Zuverlässigkeitswerte W können hierbei unter Berücksichtigung entsprechender Hindernisse auf durch die jeweiligen Schienenfahrzeuge 203 befahrenen Schienenwegen 201 bestimmt werden, die eine Abweichung der Ansteuerung des jeweiligen Schienenfahrzeugs 203 von der vorbe-

stimmten Fahrtrajektorie bewirken. Die Hindernisse können hierbei beispielsweise Baustellen oder temporäre Sperrungen der Schienenwege 201 bzw. auf den jeweiligen Schienenwegen 201 vorausfahrende weitere Schienenfahrzeuge 203 sein, die ein vordefiniertes Verfahren des jeweiligen Schienenfahrzeugs mit einer vorbestimmten Geschwindigkeit verhindern oder einschränken. Die Zuverlässigkeitswerte W der einzelnen Schienenfahrzeuge 203 können hierbei in einer binären Formulierung ausgedrückt sein und jeweils ausschließlich die Werte 0 und 1 annehmen. Alternativ können die Zuverlässigkeitswerte W einen beliebigen Zahlenwert zwischen einem definierten Minimalwert und Maximalwert annehmen. Der definierte Minimalwert kann hierbei auf den Zahlenwert 0 festgelegt sein, während der definierte Maximalwert auf den Zahlenwert 1 festgelegt sein kann.

[0085] In einem folgenden Verfahrensschritt 103 werden basierend auf den Zustandsdaten der Schienenfahrzeuge 203 und den zuvor bestimmten Zuverlässigkeitswerten W für die Schienenfahrzeuge 203 Energietrajektorien ET berechnet. Für Schienenfahrzeuge 203, die einen Zuverlässigkeitswert W aufweisen, der in binärer Formulierung den Zahlenwert 1 annimmt bzw. in nicht-binärer Formulierung einen vordefinierten Grenzwert erreicht oder überschreitet, wird hierbei als Energietrajektorie ET die im energieoptimierten Fahrplan definierte Referenztrajektorie RT ausgewählt. Die Referenztrajektorie RT beschreibt hierbei eine energieoptimierte Ansteuerung eines jeweiligen Schienenfahrzeugs 203 entlang eines vordefinierten Schienenwegs 201 über einen vordefinierten Zeitabschnitt T. Für Schienenfahrzeuge 203, deren Zuverlässigkeitswert W in binärer Formulierung den Zahlenwert 0 annimmt bzw. in nichtbinärer Formulierung den vordefinierten Grenzwert weder erreicht noch überschreitet, werden individuelle Energietrajektorien ET gemäß den Ausführungsbeispielen der Figuren 4 bis 6 ermittelt. Die Energietrajektorien ET können hierbei bezüglich verschiedener Abweichungen U1, U2 von den im energieoptimierten Fahrplan vordefinierten Referenztrajektorien RT abweichen. Die Abweichungen können beispielsweise auf verlängerten bzw. verkürzten Standzeiten bzw. zeitlich früheren bzw. zeitlich späteren Abfahrts- oder Ankunftszeiten der Schienenfahrzeuge 203 an entsprechenden Haltestellen der zu befahrenden Schienenwege 201 basieren.

[0086] Die Verfahrensschritte 101 und 103 können beispielsweise durch entsprechend trainierte neuronale Netze ausgeführt werden. Die entsprechenden neuronalen Netze können hierbei entweder auf realen Zustandsdaten der Schienenfahrzeuge 203 trainiert werden, die während entsprechender Fahrten der Schienenfahrzeuge 203 entlang der Schienenwege 201 des Schienenverkehrsnetzes 200 aufgenommen wurden, oder auf Simulationsdaten entsprechender Schienenverkehrssimulationsprogramme, wie beispielsweise dem Simulationsprogramm FALKO, trainiert werden. Die entsprechenden neuronalen Netze können basierend auf den realen oder simulierten Zustandsdaten der Schienenfahr-

zeuge 203, die eine bestimmte Verkehrssituation der jeweiligen Schienenfahrzeuge 203 beschreiben, trainiert werden, eine entsprechende Beurteilung in Form eines entsprechenden Zuverlässigkeitswerts W zu fällen. Darüber hinaus können die neuronalen Netze darauf trainiert werden, basierend auf den Zustandsdaten und den dadurch beschriebenen Verkehrssituationen der einzelnen Schienenfahrzeuge 203 entsprechende Energietrajektorien ET der Schienenfahrzeuge 203 vorherzusagen. Hierzu können die neuronalen Netze auf tatsächlich durch die jeweiligen Schienenfahrzeuge 203 in entsprechenden Verkehrssituationen ausgeführte Energietrajektorien ET zurückgreifen.

[0087] Die Energietrajektorien ET können hierbei gemäß den Ausführungsformen der Figuren 4 bis 6 Energieentnahmewerte ET1 und Energieeinspeisungswerte ET2 aufweisen. Energietrajektorien ET, die von der Referenztrajektorie RT abweichen, können hierbei gemäß einer pessimistischen Einschätzung des Energieverbrauchs des jeweiligen Schienenfahrzeugs 203 berücksichtigt werden. Die pessimistische Einschätzung des Energieverbrauchs kann hierbei dadurch ausgedrückt werden, dass die Energieentnahmewerte ET1 der einzelnen Energietrajektorien ET als maximale Energieentnahmewerte ET1 aus einer Kombination der Referenztrajektorie RT und der entsprechenden Energietrajektorie ET bestimmt werden, während die Energieeinspeisungswerte ET2 als minimale Energieeinspeisungswerte ET2 der Kombination der Referenztrajektorie RT und der jeweiligen Energietrajektorie ET gemäß den Ausführungsbeispielen in Figuren 4 bis 6 berücksichtigt werden.

[0088] In einem darauffolgenden Verfahrensschritt 105 wird ein Energiebedarfswert GE des Schienenverkehrs der Gesamtheit der Mehrzahl der Schienenfahrzeuge 203 ermittelt. Der Energiebedarfswert GE wird hierbei anhand einer Gesamtheit der einzelnen Energieverbräuche der Mehrzahl der Schienenfahrzeuge 203 und in Form einer Summe der verschiedenen Energietrajektorien ET berechnet. Für die Schienenfahrzeuge 203, deren Zuverlässigkeitswerte W den vorbestimmten Grenzwert erreichen oder überschreiten, wird hierbei zur Berechnung des Energiebedarfswerts GE die jeweilige Referenztrajektorie RT verwendet.

[0089] In einem folgenden Verfahrensschritt 107 werden die zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 gegenüber den im energieoptimierten Fahrplan definierten Referenzwerten PR gemäß dem Optimierungsprozess in FIG 7 variiert. Hierbei werden ausschließlich die zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 der Schienenfahrzeuge 203 gegenüber dem Referenzwert PR variiert, die einen Zuverlässigkeitswert W aufweisen, der den vordefinierten Grenzwert erreicht oder überschreitet. Die zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 der Schienenfahrzeuge 203, deren Zuverlässigkeitswert W den vorbestimmten Grenzwert nicht erreicht oder überschreitet und die somit nicht gemäß der vordefinierten Referenztrajektorie RT ansteuerbar sind, werden hingegen zur Berechnung des Energiebedarfswerts GE der Ge-

samtheit der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen 203 auf den jeweiligen Referenzwert PR fixiert.

[0090] Die Verfahrensschritte 101, 103, 105 und 107 können hierbei rekursiv durchgeführt werden. Hierzu können für die einzelnen Schienenfahrzeuge 203 für jeden variierten zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 entsprechend erneut Zuverlässigkeitswerte W und Energietrajektorien ET und darauf basierend Werte des Energiebedarfswerts GE der Gesamtheit der Schienenfahrzeuge 203 gemäß dem Optimierungsprozess in FIG 7 berechnet werden.

[0091] In einem weiteren Verfahrensschritt 109 wird ein optimierter Satz P von zeitlichen Steuerparametern P1, P2, P3, P4 ermittelt. Der optimierte Satz P von zeitlichen Steuerparametern P1, P2, P3, P4 ermöglicht eine energieoptimierte Ansteuerung der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen 203 des zu optimierenden Schienenverkehrs.

[0092] In einem weiteren Verfahrensschritt 111 wird der optimierte Satz P von zeitlichen Steuerparametern P1, P2, P3, P4 an die entsprechenden Schienenfahrzeuge 203 bereitgestellt.

[0093] Die zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 können beispielsweise Ankunftszeiten, Standzeiten und/oder Abfahrtszeiten der Schienenfahrzeuge 203 an entsprechenden Haltestellen der Schienenwege 201 des Schienenverkehrsnetzes 200 darstellen. Die zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 können im Verfahrensschritt 107 innerhalb einer maximal gültigen Variation variiert werden. Die maximal gültige Variation kann hierbei beispielsweise eine minimal oder maximal zulässige Standzeit bzw. eine minimal oder maximal zulässige Ankunfts- oder Abfahrtszeit des jeweiligen Schienenfahrzeugs 203 an der entsprechenden Haltestelle definieren.

[0094] Die Verfahrensschritte 107 und 109 können beispielsweise durch einen entsprechenden Optimierungsalgorithmus, beispielsweise durch einen Greedy Optimizer, ausgeführt werden.

[0095] FIG 9 zeigt eine weitere schematische Darstellung des Systems 300 zur Optimierung eines Schienenverkehrs.

[0096] FIG 9 zeigt eine Darstellung des Systems 300 zur Optimierung eines Schienenverkehrs, das eingerichtet ist, das erfindungsgemäße Verfahren 100 gemäß den oben beschriebenen Ausführungsformen auszuführen. Das System 300 umfasst in der gezeigten Ausführungsform einen Optimierungsalgorithmus OPT, ein entsprechend trainiertes neuronales Netz FM und ein Energiebedarfsberechnungsmodul PRNC. Das neuronale Netz FM wird basierend auf Trainingsdaten 315, die beispielsweise reale oder simulierte Zustandsdaten von Schienenfahrzeugen 203 umfassen, trainiert, basierend auf realen Zustandsdaten von Schienenfahrzeugen 203 entsprechende Zuverlässigkeitswerte W und Energietrajektorien ET der in den jeweiligen Verkehrssituationen befindlichen Schienenfahrzeugen 203 vorherzusagen.

[0097] Im Betrieb des gezeigten Systems 300 sagt das entsprechend trainierte neuronale Netz FM basierend

auf realen Zustandsdaten von Schienenfahrzeugen 203 eines zu optimierenden Schienenverkehrs entsprechenden Energietrajektorien ET und Zuverlässigkeitswerte W gemäß den oben beschriebenen Ausführungsformen voraus. Die Energietrajektorien ET des neuronalen Netzes FM werden an das Energiebedarfsberechnungsmodul PRNC weitergeleitet. Die durch das neuronale Netz FM vorhergesagten Zuverlässigkeitswerte W werden simultan in den Optimierungsalgorithmus OPT übertragen. Das Energiebedarfsberechnungsmodul PRNC berechnet basierend auf den Energietrajektorien ET des neuronalen Netzes FM und basierend auf zeitlichen Steuerparametern P1, P2, P3, P4 entsprechende Werte eines Energiebedarfswerts GE der Gesamtheit der Schienenfahrzeuge 203. Die Energiebedarfswerte GE werden vom Energiebedarfsberechnungsmodul PRNC ebenfalls in den Optimierungsalgorithmus OPT integriert. Basierend auf den Energiebedarfswerten GE und den Zuverlässigkeitswerten W führt der Optimierungsalgorithmus OPT gemäß den oben beschriebenen Ausführungsformen eine Variation der zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 durch und gibt diese variierten zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 an das neuronale Netz FM weiter. Dieses berechnet für die variierten zeitlichen Steuerparameter P1, P2, P3, P4 für die entsprechenden Schienenfahrzeuge 203 erneute Zuverlässigkeitswerte W und Energietrajektorien ET. Die erneut berechneten Energietrajektorien ET werden durch das neuronale Netz FM an das Energiebedarfsberechnungsmodul PRNC und die erneut berechneten Zuverlässigkeitswerte W an den Optimierungsalgorithmus OPT übertragen. In rekursiver Ausführung wird somit der Optimierungsprozess durchgeführt, bis ein Minimum des Energiebedarfswerts GE ermittelt und darauf basierend ein energieoptimierter Satz P von zeitlichen Steuerparametern P1, P2, P3, P4 generiert wird.

[0098] FIG 10 zeigt eine schematische Darstellung eines Computerprogrammprodukts 400.

[0099] FIG 10 zeigt ein Computerprogrammprodukt 400, umfassend Befehle, die bei der Ausführung des Programms durch eine Recheneinheit dieses veranlassen, das Verfahren 100 nach einer der oben genannten Ausführungsformen auszuführen. Das Computerprogrammprodukt 400 ist in der gezeigten Ausführungsform auf einem Speichermedium 401 gespeichert. Das Speichermedium 401 kann hierbei ein beliebiges aus dem Stand der Technik bekanntes Speichermedium sein.

[0100] Obwohl die Erfindung im Detail durch das bevorzugte Ausführungsbeispiel näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzbereich der Erfindung zu verlassen.

Patentansprüche

1. Verfahren (100) zum Optimieren eines Schienenver-

kehrs eines Schienenverkehrsnetzes (200) mit einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203), wobei das Verfahren (100) umfasst:

- Ermitteln (101) von Zuverlässigkeitswerten (W) für Schienenfahrzeuge (203) des Schienenverkehrsnetzes (200) basierend auf Zustandsdaten der Schienenfahrzeuge (203), wobei die Zustandsdaten Betriebszustände der Schienenfahrzeuge (203) innerhalb des Schienenverkehrsnetzes (200) beschreiben, und wobei ein Zuverlässigkeitswert (W) für ein Schienenfahrzeug (203) in einem bestimmten Betriebszustand eine Wahrscheinlichkeit angibt, dass das Schienenfahrzeug (203) gemäß einer energieoptimierten Referenztrajektorie (RT) verfahrbar ist;
- Ermitteln (103) von Energietrajektorien (ET) der Schienenfahrzeuge (203) basierend auf den Zustandsdaten und zeitlichen Steuerparametern (P1, P2, P3, P4) der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203), wobei eine Energietrajektorie (ET) einen Energieverbrauch eines Schienenfahrzeugs (203) für einen durch das Schienenfahrzeug (203) zu befahrenden Streckenabschnitt (201) des Schienenverkehrsnetzes (200) beschreibt;
- Ermitteln (105) eines Energiebedarfswerts (GE) der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203) des Schienenverkehrsnetzes (200) basierend auf den Energietrajektorien (ET) und zeitlichen Steuerparametern (P1, P2, P3, P4) der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203);
- Variieren (107) der zeitlichen Steuerparameter (P1, P2, P3, P4) der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203) von vorbestimmten Referenzwerten (PR) in Abhängigkeit der Zuverlässigkeitswerte (W);
- Generieren (109) eines optimierten Satzes (P) der zeitlichen Steuerparameter, wobei eine Steuerung der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203) gemäß dem optimierten Satz (P) von zeitlichen Steuerparametern zu einem minimierten Energiebedarfswert (GE) der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203) führt; und
- Bereitstellen (111) des optimierten Satzes (P) von zeitlichen Steuerparametern der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203) .

2. Verfahren (100) nach Anspruch 1, wobei die zeitlichen Steuerparameter (P1, P2, P3, P4) Ankunftszeiten und/oder Abfahrtszeiten und/oder Standzeiten der Schienenfahrzeuge (203) an Haltestellen des Verkehrsnetzes (200) umfassen.

3. Verfahren (100) nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Zuverlässigkeitswerte (W) für Schienenfahrzeuge (203) unter Berücksichtigung von Hindernissen der

jeweiligen Schienenwege (201) ermittelt werden.

4. Verfahren (100) nach Anspruch 1, 2 oder 3, wobei die zeitlichen Steuerparameter (P1, P2, P3, P4) in Bezug auf einen Referenzwert (PR) variiert werden, wobei der Referenzwert (PR) in einem auf den Energiebedarfswert (GE) des Schienenverkehrsnetzes (200) optimierten Fahrplan der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203) definiert ist, und wobei die optimierte Referenztrajektorie (RT) im optimierten Fahrplan des Verkehrsnetzes (200) definiert ist. 5
5. Verfahren (100) nach Anspruch 4, wobei ausschließlich die zeitlichen Steuerparameter (P1, P2, P3, P4) der Schienenfahrzeuge (203) gegenüber dem Referenzwert (PR) variiert werden, deren Zuverlässigkeitswert (W) einen vorbestimmten Grenzwert erreichen oder überschreiten, und wobei die zeitlichen Steuerparameter (P1, P2, P3, P4) der Schienenfahrzeuge (203), deren Zuverlässigkeitswerte (W) den Grenzwert nicht erreichen, in dem Referenzwert (PR) fixiert werden. 10
6. Verfahren (100) nach Anspruch 4 oder 5, wobei die zeitlichen Steuerparameter (P1, P2, P3, P4) gegenüber dem definierten Referenzwert (PR) innerhalb einer vorbestimmten maximalen Variation variiert werden, und wobei die maximale Variation im optimierten Fahrplan definiert ist. 15
7. Verfahren (100) nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei die Energietrajektorien (ET) in Abhängigkeit der Zuverlässigkeitswerte (W) ermittelt werden, wobei für Schienenfahrzeuge (203) mit Zuverlässigkeitswerten (W), die den Grenzwert erreichen oder überschreiten, Energietrajektorien (ET) ermittelt werden, die der Referenztrajektorie (RT) entsprechen, und wobei für Schienenfahrzeuge (203) mit Zuverlässigkeitswerten (W), die den Grenzwert nicht erreichen, von der Referenztrajektorie (RT) abweichende Energietrajektorien (ET) ermittelt werden. 20
8. Verfahren (100) nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei die Energietrajektorien (ET) auf einen vorbestimmten Zeitabschnitt (T) definierte zeitliche Energiebedarfswerte (GE) der Schienenfahrzeuge (203) beschreiben und jeweils wenigstens einen Energieentnahmewert (ET1) und einen Energieeinspeisungswert (ET2) umfassen, wobei der Energieentnahmewert (ET1) eine Energiemenge beschreibt, die das jeweilige Schienenfahrzeug (203) für eine Durchführung eines Beschleunigungsprozesses aus einem Versorgungsnetz des Schienenverkehrsnetzes (200) entnimmt, und wobei der Energieeinspeisungswert (ET2) eine Energiemenge beschreibt, die das jeweilige Schienenfahrzeug (203) bei Durchführung eines Bremsvorgangs in das 25

Versorgungsnetz einspeist.

9. Verfahren (100) nach Anspruch 8, wobei zum Ermitteln des Energiebedarfswerts (GE) für Energietrajektorien (ET), die der Referenztrajektorie (RT) entsprechen, wenigstens ein Energieentnahmewert (ET1) und wenigstens ein Energieeinspeisungswert (ET2) der Referenztrajektorie (RT) berücksichtigt werden, und wobei für von der Referenztrajektorie (RT) abweichende Energietrajektorien (ET) für den Energieentnahmewert (ET1) wenigstens ein Maximalwert aus einer Kombination wenigstens eines Energieentnahmewerts (ET1) der Referenztrajektorie (RT) und wenigstens eines Energieentnahmewerts (ET1) der jeweiligen Energietrajektorie (ET) und für den Energieeinspeisungswert (ET2) wenigstens ein Minimalwert aus einer Kombination wenigstens eines Energieeinspeisungswerts (ET2) der Referenztrajektorie (RT) und wenigstens eines Energieeinspeisungswerts (ET2) der Energietrajektorie (ET) berücksichtigt werden. 30
10. Verfahren (100) nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei das Ermitteln (101) der Zuverlässigkeitswerte (W), das Ermitteln (103) der Energietrajektorien (ET), das Ermitteln (105) des Energiebedarfswerts (GE) und das Variieren (107) der zeitlichen Steuerparameter (P1, P2, P3, P4) rekursiv ausgeführt werden. 35
11. Verfahren (100) nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei der Energiebedarfswert (GE) des Schienenverkehrs einen Gesamtenergieverbrauch und/oder einen maximalen Energieverbrauch des Schienenverkehrs über einen vorbestimmten Zeitraum umfasst. 40
12. Verfahren (100) nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei das Ermitteln (101) der Zuverlässigkeitswerte (W) und/oder das Ermitteln (103) der Energietrajektorien (ET) durch ein entsprechend trainiertes neuronales Netz (FM) ausgeführt wird, und wobei das Variieren (107) der zeitlichen Steuerparameter (P1, P2, P3, P4) und das Generieren (109) eines optimierten Satzes (P) von zeitlichen Steuerparametern durch einen Optimierungsalgorithmus (OPT) ausgeführt wird. 45
13. Verfahren (100) nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei das Verfahren (100) in einem Online-Betrieb der Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203) im Schienenverkehr des Schienenverkehrsnetzes (200) ausgeführt wird. 50
14. System (300) zum Optimieren eines Schienenverkehrs mit einer Recheneinheit (301), die eingerichtet ist, das Verfahren (100) zum Optimieren eines Schienenverkehrs eines Schienenverkehrsnetzes 55

(200) mit einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen
(203) nach einem der voranstehenden Ansprüche 1
bis 13 auszuführen.

15. Computerprogrammprodukt (400) umfassend Befehle, die bei der Ausführung des Programms durch eine Datenverarbeitungseinheit diese veranlassen, das Verfahren (100) zum Optimieren eines Schienenverkehrs eines Schienenverkehrsnetzes (200) mit einer Mehrzahl von Schienenfahrzeugen (203) nach einem der voranstehenden Ansprüche 1 bis 13 auszuführen.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

FIG 1

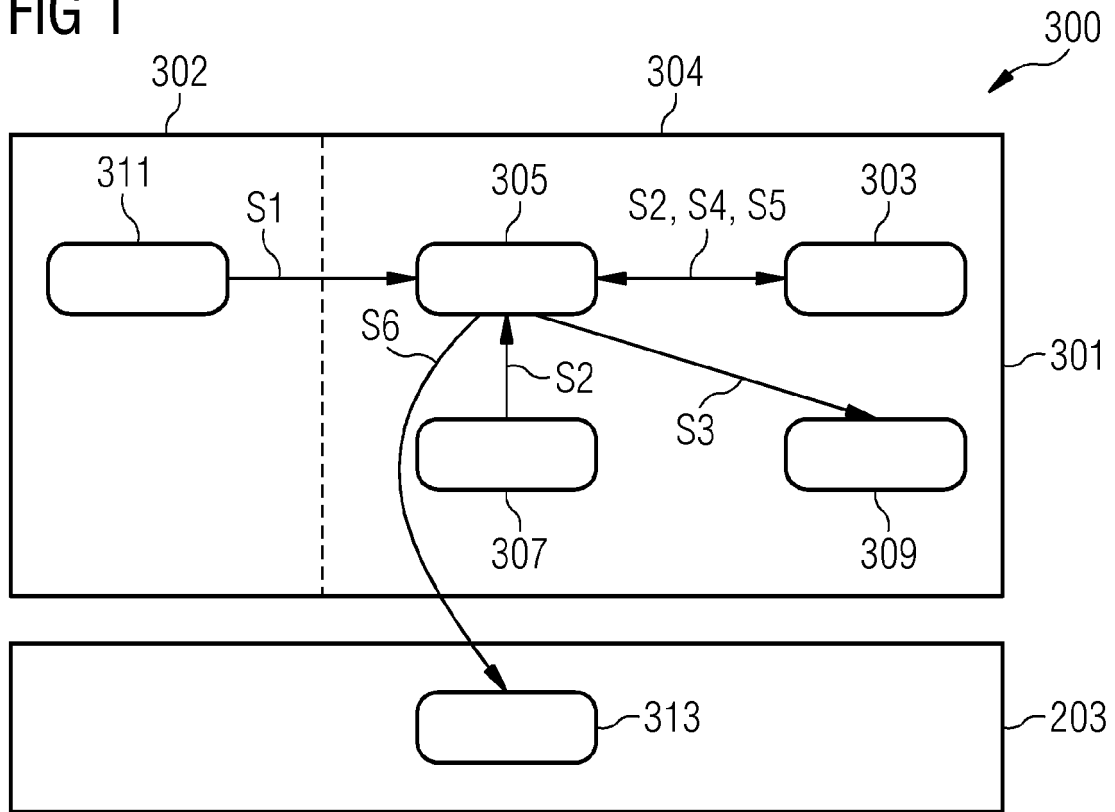


FIG 2

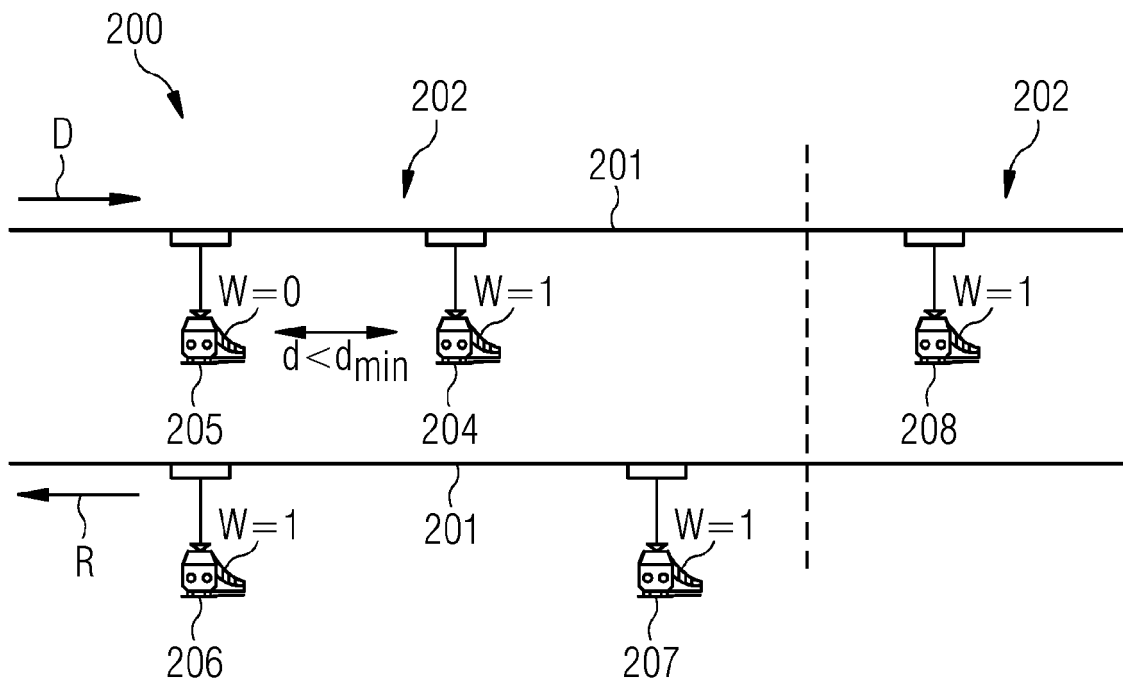


FIG 3

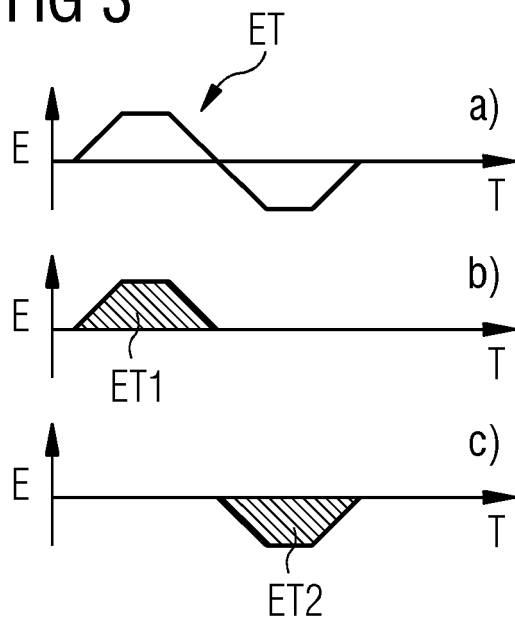


FIG 4

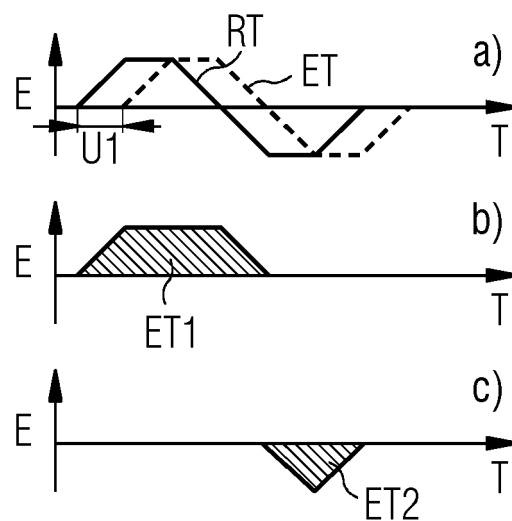


FIG 5

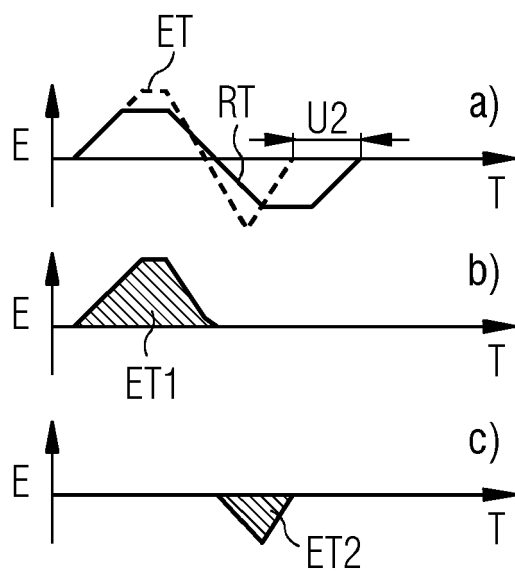


FIG 6

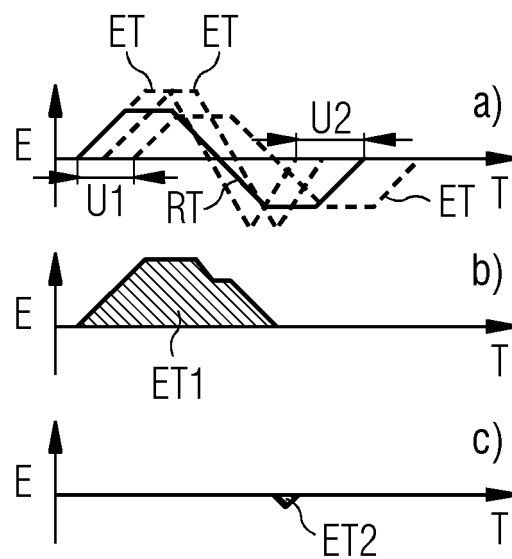


FIG 7

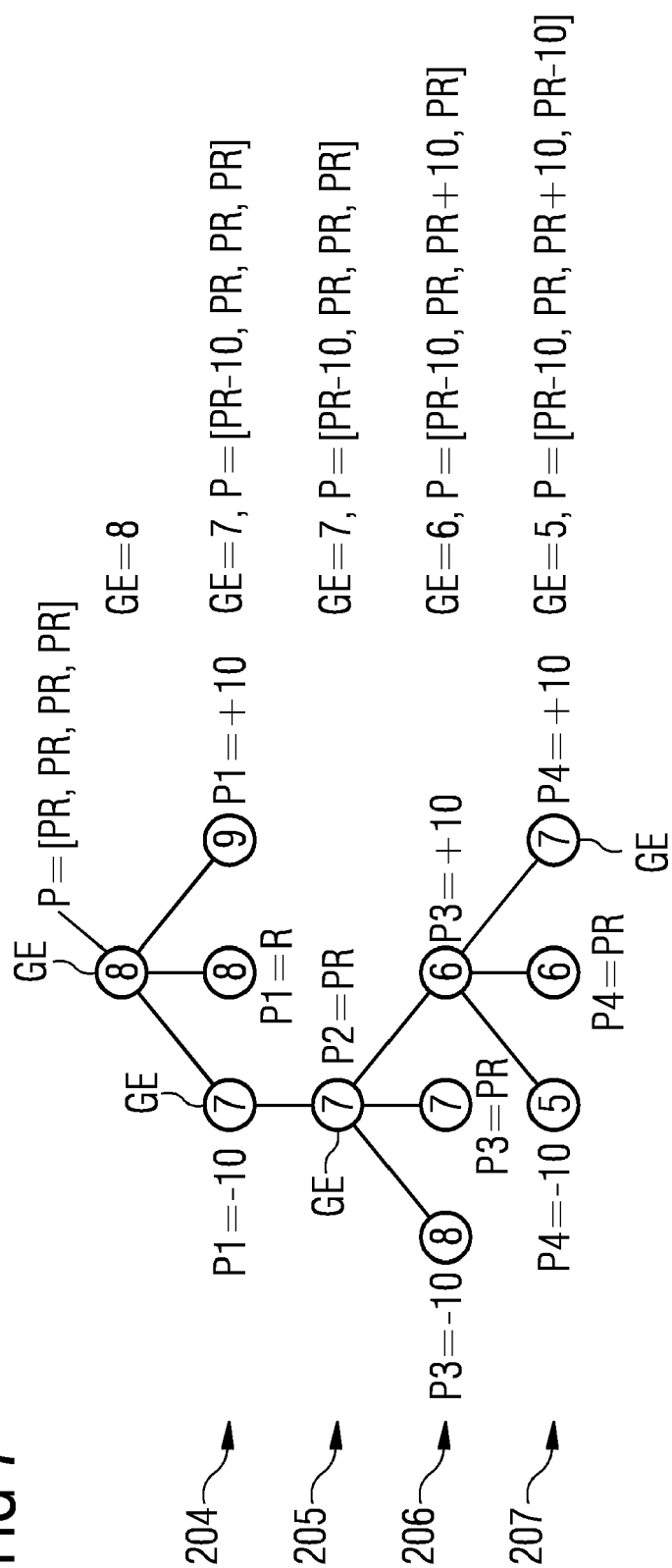


FIG 8

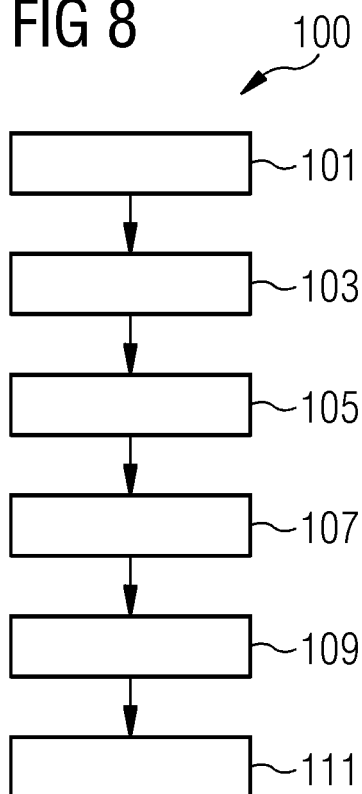


FIG 9

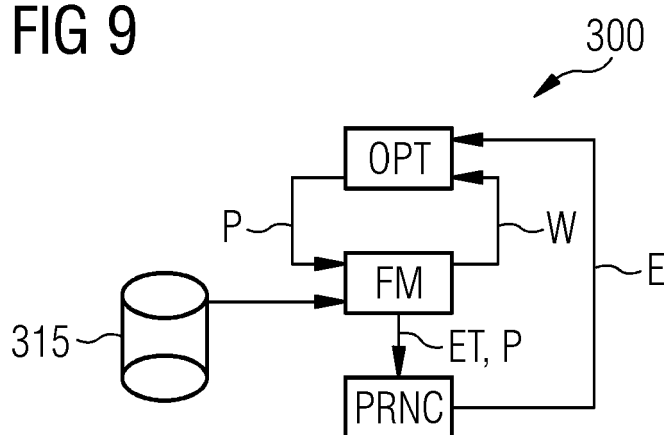
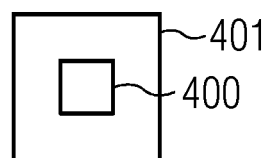


FIG 10





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 21 16 4907

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
Y A	DE 10 2018 211295 A1 (SIEMENS MOBILITY GMBH [DE]) 9. Januar 2020 (2020-01-09) * Absatz [0003] - Absatz [0056]; Abbildungen 1-4 *	1-7, 10-15 8,9	INV. B61L3/00
Y A	----- CN 109 544 011 A (UNIV BEIJING JIAOTONG) 29. März 2019 (2019-03-29) * Absatz [0004] - Absatz [0156]; Abbildungen 1-8 *	1-7, 10-15 8,9	
A	----- EP 2 532 563 A2 (KNORR BREMSE SYSTEME [DE]) 12. Dezember 2012 (2012-12-12) * Absatz [0005] - Absatz [0037]; Abbildung 1 *	1-15	
A	----- DE 10 2016 116414 A1 (KNORR BREMSE SYSTEME [DE]) 8. März 2018 (2018-03-08) * Absatz [0005] - Absatz [0036]; Abbildungen 1-2 *	1-15	

			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			B61L
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 16. September 2021	Prüfer Kassner, Holger
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 : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, 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	

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

EP 21 16 4907

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.

16-09-2021

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
	DE 102018211295 A1	09-01-2020	DE 102018211295 A1	09-01-2020
			WO 2020011461 A1	16-01-2020
15	CN 109544011 A	29-03-2019	KEINE	
	EP 2532563 A2	12-12-2012	DE 102011103679 A1	13-12-2012
			EP 2532563 A2	12-12-2012
20	DE 102016116414 A1	08-03-2018	DE 102016116414 A1	08-03-2018
			EP 3507164 A1	10-07-2019
			WO 2018041570 A1	08-03-2018
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				

EPO FORM P0461

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