

Approximation von Bediensystemen zur Leistungsfähigkeitsbestimmung von Eisenbahninfrastruktur in Bahnhöfen

Wir stellen eine Methode zur Leistungsanalyse von Bahnhofsinfrastruktur vor, die Ankunfts- und Abfahrtsprozesse sowie Verkehrshalte in einem kombinierten Bediensystem für den gesamten Bahnhof abbildet. Das System wird als zeitkontinuierliche Markov-Kette modelliert und per probabilistischem Model Checking ausgewertet. Dieser Beitrag ist eine gekürzte Fassung des Konferenzbeitrags [1].



1. Einleitung

Zur strategischen Planung der Weiterentwicklung von Eisenbahnnetzen ist die frühzeitige Quantifizierung der Leistungsfähigkeit von Eisenbahninfrastruktur von großer Bedeutung. In vielen Fällen wird die Infrastruktur für mehrere Dekaden geplant; es ist dementsprechend essenziell, fahrplanunabhängige Methoden zur Bewertung von Eisenbahninfrastruktur einzusetzen. Strecken und Knoten können zur fahrplanunabhängigen Planung mit Bediensystemen modelliert werden.

Während Strecken als einkanalige Systeme analysiert werden können, erfordert die Bewertung von Bahnhöfen die Modellierung von komplexeren Bediensystemen. Die existierenden bedientheoretischen Methoden zur Leistungsfähigkeitsbetrachtung von Eisenbahninfrastruktur in Bahnhöfen beschreiben bisher in erster Linie entweder die isolierte Leistungsfähigkeit von Gleisgruppen [2, 3] oder Gesamtfahrstraßenknoten [4, 5, 6].

Um eine Berechnung der planmäßigen Leistungsfähigkeit im Gesamtsystem aus Gleisgruppe und Gesamtfahrstraßenknoten zu ermöglichen, wird in [7] der Ansatz aus [6] zur Leistungsfähigkeitsanalyse von Abzweigstellen weiterentwickelt. Dieses Modell ermöglicht zwar die Berechnung fahrwegsscharfer Leistungskennzahlen, der Berechnungsaufwand steigt aber exponentiell mit der Anzahl der betrachteten Fahrwege. Im Folgenden soll dieses Modell deshalb so angepasst werden, dass eine

Berechnung unabhängig von der Größe des betrachteten Knotens möglich ist.

In diesem Beitrag stellen wir ein Verfahren zur Analyse der planmäßigen Leistungsfähigkeit von gesamten Bahnhöfen vor. Dabei werden die Gesamtfahrstraßenknoten mit Hilfe der Verkettungsmethode nach Schwanhäußer [4] abstrahiert und die entstehenden Bedienprozesse in einem gemeinsamen Modell mit den Bedienprozessen auf der Gleisgruppe kombiniert. Das Gesamtsystem wird in einem kombinierten Bediensystem modelliert und als zeitkontinuierliche Markov-Kette dargestellt. Darüber können unterschiedliche Kennzahlen zur planmäßigen Leistungsfähigkeit der analysierten Bahnhofsinfrastruktur errechnet werden.

2. Bediensysteme zur Analyse von Eisenbahnknoten

2.1. Modellierung von Eisenbahnknoten

Betrachten wir die Infrastruktur eines Beispielbahnhofs, der aus zwei Gesamtfahrstraßenknoten (GFK) West (W) und Ost (O), einer Gleisgruppe (GG) und zwei durchgehenden Hauptgleisen (HG) besteht. In Abbildung 1 wird die Modellierung eines Beispiel-Bahnhofs als kombiniertes Bediensystem skizziert. Die verschiedenen Fahrstraßen eines Bahnhofs können anhand des in ihrer Einfahrt verwendeten GFK, sowie der Angabe, ob sie in der Gleisgruppe halten (bzw. wenden) oder auf den Hauptgleisen ohne Halt durchfahren, zu Strömen



Tamme Emunds, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Gruppenleiter „Modellierung und Analyse“
Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen (VIA)
emunds@via.rwth-aachen.de



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen

Leiter des Verkehrswissenschaftlichen Instituts,
Inhaber des Lehrstuhls für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft
Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen (VIA)
niessen@via.rwth-aachen.de

zusammengefasst werden. Dabei kann entweder ein GFK zur Einfahrt und der andere zur Ausfahrt genutzt werden, oder bei einer Wende derselbe GFK für Ein- und Ausfahrt benutzt werden. Die mehrkanalige Gleisgruppe steht dabei für alle haltenden Anfragen zur Verfügung; Züge ohne planmäßigen Halt werden auf den durchgehenden Hauptgleisen geplant.

Der Bedienprozess einer Anfrage lässt sich dementsprechend in die drei Phasen Einfahrt, Halt und Ausfahrt aufteilen. Für Anfragen ohne planmäßigen Halt werden nur die beiden Phasen zur Ein- und Ausfahrt betrachtet. Wir bezeichnen die Bedienzeiten in den einzelnen Phasen als

Einfahrtsperrzeit, Haltezeit und Ausfahrtsperrzeit. Die Sperrzeiten sollten typischerweise aus einem mikroskopischen Modell errechnet werden, siehe bspw. [8]. Falls keine mikroskopischen Daten verfügbar sind, müssen die Sperrzeiten geschätzt werden. Die Haltezeiten können beispielsweise aus historischen Daten oder Fahrplänen in ähnlichen Knotenpunkten für die einzelnen Verkehrsarten geschätzt werden.

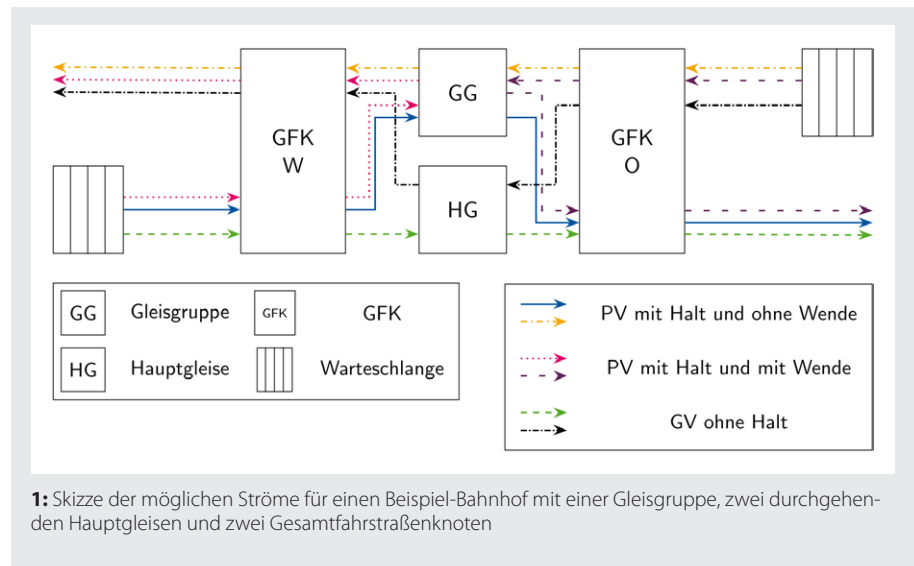
Insgesamt können Forderungen aus zwei verschiedenen Ankunftsströmen in das System eintreten. Anhand der Durchfahrtswahrscheinlichkeit, welche den Anteil der durchfahrenden Züge beschreibt, können die ankommenden Anfragen auf die Gleisgruppe und die Hauptgleise aufgeteilt werden. Analog beschreibt die Wendewahrscheinlichkeit den Anteil der wendenden Zugfahrten in der Gleisgruppe.

In der hier diskutierten Modellierung des Gesamtsystems werden die Bedienprozesse der Ein- bzw. Ausfahrt auf den Gesamtfahrstraßenknoten O und W durch jeweils ein einkanaliges Bediensystem approximiert.

2.2. Formulierung als zeitkontinuierliche Markov-Kette

Das in Abbildung 1 dargestellte Gesamtsystem eines Bahnhofs kann über die Mengen der Zustände S und Übergänge U zwischen den Zuständen als zeitkontinuierliche Markov-Kette beschrieben werden. Dabei kann ein Zustand $s = (s_{GFK\ O}, s_{GFK\ W}, s_{GG}, s_{HG}) \in S$ als Tupel der Einzelsystemzustände $s_{GFK\ O}, s_{GFK\ W}, s_{GG}, s_{HG}$ beschrieben werden.

Die Eigenschaften des Teilzustands $s_{GFK\ O} = (q_O, q_O^n, e_O, d_O)$ von GFK O (und analog von GFK W) beschreiben die Anzahl der aktuell auf Einfahrt wartenden Forderungen q_O , sowie die Tatsache, ob die nächste Forderung in der Warteschlange durchfährt, $q_O^n = 1$, oder in der Gleisgruppe hält, $q_O^n = 0$. Außerdem wird für haltende Züge beschrieben, ob der GFK zum aktuellen Zeitpunkt über eine einfahrende



$e_O = 1$ oder ausfahrende $d_O = 1$ Zugfahrt belegt ist oder gerade keine entsprechende Belegung ($e_O = d_O = 0$) erfolgt.

Für den Gleisgruppenzustand $s_{GG} = (tr_O, tr_W, tr_O^W, tr_W^W)$ wird die Anzahl der aktuell haltenden Züge mit Ausfahrt über GFK O tr_O oder GFK W tr_W nachgehalten. Forderungen, die bereits ihre Mindesthaltezeit eingehalten haben und auf Ausfahrt warten, werden ebenfalls nach Ausfahrtrichtung getrennt über tr_O^W, tr_W^W modelliert.

Über den Zustand der Hauptgleise $s_{HG} = (hg_O, hg_W)$ lässt sich nachhalten, in welcher Bedienphase sich die Hauptgleise aus Richtung GFK O (oder analog GFK W) befinden. Sie können entweder aktuell nicht in Bedienung sein $hg_O = 0$, oder einen durchfahrenden Zug $hg_O \in \{1, 2\}$ in einer der beiden Bedienungsphasen beschreiben. Dabei ist die Bedienung in zwei Phasen aufgeteilt, um die Bedienzeiten der einkanaligen Ersatzsysteme für die beiden GFK getrennt zu betrachten. Zur Durchfahrt eines Zuges sind aber immer beide GFK für anderweitige Nutzung gesperrt.

Die in den Zuständen beschriebenen Eigenschaften der mehrkanaligen Gleisgruppe und der als einkanalig approximierten GFK werden über die Übergänge im Markov-Ketten-Modell miteinander verknüpft. Eine genaue Auflistung aller Übergänge und der entsprechenden Übergangsraten ist in der Langfassung [1] angegeben.

2.3. Berechnung von Leistungsfähigkeitskennzahlen

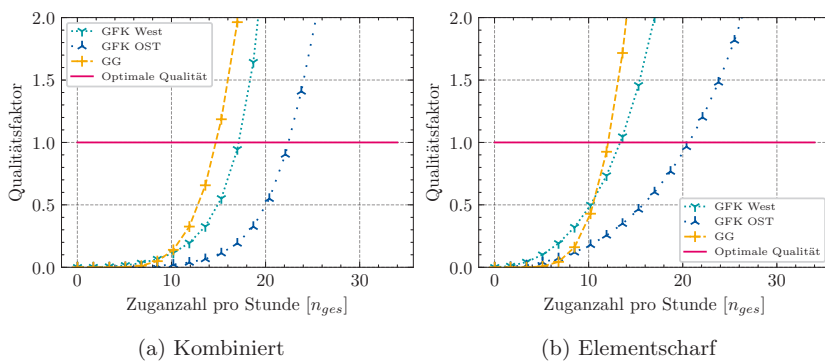
Mit Hilfe der im vorherigen Abschnitt beschriebenen zeitkontinuierlichen Markov-Kette, können Kennzahlen zur

Beschreibung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems berechnet werden. Dafür werden die Kennzahlen in Abhängigkeit von den Zustandswahrscheinlichkeiten der Markov-Kette im stationären Zustand ausgedrückt. In dieser Arbeit verwenden wir die Methodik aus [6, 7] und benutzen das Python-Modul *stormpy* [9], um die Kennzahlen mit Hilfe von Algorithmen zum probabilistischen Model-Checking [10] zu erhalten.

Das über die Markov-Kette formalisierte System beschreibt dabei lediglich exponentialverteilte Übergangszeiten. Zur Approximation der unterstellten GI Ankunfts- und Bedienprozesse benutzen wir die Formeln von Hertel, siehe Abschnitt 2.1 des Konferenzbeitrags [1]. Für die Schätzung der erwarteten Warteschlangenlänge verwenden wir einen Parameter von $k=1$ und für die Schätzung der Wartewahrscheinlichkeit unterstellen wir ein $k=k_{GG}$ -kanaliges Bediensystem, wobei k_{GG} die Anzahl der Haltegleise in der Gleisgruppe beschreibt. Hierbei ist anzumerken, dass die Approximationsformeln von Hertel primär zur Abschätzung der Warteschlangenlänge geeignet sind. Da sich die Wartewahrscheinlichkeit proportional zur Warteschlangenlänge verhält, benutzen wir die Formel aber auch zur Approximation der Wartewahrscheinlichkeit.

Um eine Einschätzung über die Leistungsfähigkeit zu ermitteln, vergleichen wir die errechneten Warteschlangenlängen und Wartewahrscheinlichkeiten mit den Grenzwerten aus [11]. Dabei wird für die Warteschlangenlänge ein Grenzwert (vgl. [11, 12]) von $L_{max} = 0.479 \cdot \exp(-1.3p_{RZ}) \cdot 1/\varphi$ in Abhängigkeit von dem Anteil der Per-

Über die Formalisierung als Markov-Kette ist eine Berechnung von Leistungsfähigkeitskennzahlen durch Methoden des Model-Checking möglich.



2: Der erwartete Qualitätsfaktor nach Zugzahl im Gesamtsystem für die kombinierte Berechnung und im Vergleich für die Approximation des einzelnen Elements

sonenzüge p_{Rz} am Betriebsprogramm und der Verkettungszahl ϕ des Gesamtfahrstraßenknotens (siehe Anhang des Konferenzbeitrags [1]) unterstellt. Für die Wartewahrscheinlichkeit in Personenbahnhöfen wird ein Grenzwert von $p_{W,max} = 0.05$ festgesetzt.

Der Quotient aus errechneter Kennzahl und Grenzwert wird im Folgenden als Qualitätsfaktor bezeichnet. Die planmäßige Leistungsfähigkeit ist bei einem Qualitätsfaktor von 1.0 erreicht, Werte darüber deuten auf eine zu geringe Leistungsfähigkeit für das unterstellte Betriebsprogramm, während ein Qualitätsfaktor deutlich unter 1.0 für eine unwirtschaftliche Planung spricht.

3. Anwendungsbeispiel

Zur Anwendung der skizzierten Methode betrachten wir im Folgenden die Infrastruktur von Aachen Hbf. Im Anhang von [1] sind der Gleisplan und ein Beispiel-Fahrplan für eine Stunde im Juli 2025 zu finden. Damit wurde ein Betriebsprogramm mit zugehörigen Fahrstraßen und entsprechenden Konflikten konstruiert. Außerdem wurden die Sperrzeiten für Aus- und Einfahrten ge-

schätzt. Die hier ermittelten Aussagen zur Leistungsfähigkeit sind also nicht unbedingt als repräsentativ für die tatsächliche Infrastruktur zu bewerten.

Insgesamt sind für die analysierte Spitzenstunde 17 Zugfahrten angefragt. Davon kommen 7 über den GFK O aus Richtung Rothe Erde (ARE) und 10 über den GFK W aus Richtung Belgien (BEL) oder Aachenschanz (ASZ) in das Gesamtsystem an. Mit den Angaben von Betriebsprogramm und Sperrzeiten wurden die Ankunfts- und Bediendaten der Bediensysteme ermittelt. Die Langfassung [1] legt die Berechnung aller Eingangsparameter detailliert dar.

Das Gesamtsystem wurde mit Hilfe der in Abschnitt 2 vorgestellten zeitkontinuierlichen Markov-Kette mit einer Anzahl von $m = 10$ Wartepositionen pro GFK modelliert, die entsprechende Markov-Kette besteht aus 1,449,096 Zuständen und 7,798,208 Übergängen. Das probabilistische Model-Checking benötigte auf einem Computer (i7-1260P mit 8x 2.1 Ghz und 16GB RAM) insgesamt ca. 40 s zur Berechnung aller verwendeten Kennzahlen pro Szenario. Zur Visualisierung der Staueffekte wurden die Kennzahlen für Szenarien mit verschiedenen Zugzahlen zwischen 1.7 und 34 berechnet, wobei lediglich die Ankunftsdaten proportional verändert wurden. Die relative Aufteilung der Verkehrsmenge auf die verschiedenen Ströme durch den Knoten wurde dabei nicht verändert.

Zum Vergleich wurden dieselben Szenarien auch mit den isolierten Berechnungsverfahren für Gesamtfahrstraßenknoten nach [4] und Gleisgruppen nach [3] betrachtet.

Zur Bestimmung der planmäßigen Leistungsfähigkeit können die Qualitätsfaktoren (siehe Abschnitt 2.3) der Kompo-

nenten betrachtet werden. In Abbildung 2 ist der Qualitätsfaktor nach Teilelementen in der kombinierten (2a) und isolierten (2b) Betrachtung dargestellt. Beide Methoden weisen die höchsten Qualitätsfaktoren für die Gleisgruppe auf, gefolgt von GFK West und schließlich GFK Ost. Allerdings liegt die Auslastung von GFK West in der isolierten Betrachtung sehr nah an der Auslastung der Gleisgruppe und wird bei kleineren Verkehrsmengen sogar zum rechnerischen Engpass.

Im Vergleich der beiden Methoden ist zu erkennen, dass die Modellierung als Gesamtsystem deutlich höhere Zugzahlen für das gleiche Qualitätsniveau erlaubt. Im Gesamtsystem profitieren die Warteschlangen vor den beiden GFK dabei von dem zusätzlichen Warteraum der GG. Aber auch für die Gleisgruppe werden durch die gemeinsame Modellierung geringere Qualitätsfaktoren berechnet, da ankommende Forderungen bereits zur Einfahrt vor den GFK synchronisiert werden.

4. Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Beitrag wurde eine neue Methode zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Eisenbahnknoten im Gesamtsystem vorgestellt. Dazu werden die Gesamtfahrstraßenknoten mit der Verkettungsmethode als einkanaliges Bediensystem abstrahiert und gemeinsam mit der Gleisgruppe in einem kombinierten Bediensystem modelliert. Über die Formalisierung als zeitkontinuierliche Markov-Kette ist eine Berechnung von Leistungsfähigkeitskennzahlen durch Methoden des probabilistischen Model-Checking möglich.

Die Ergebnisse eines Beispielknotens zeigen eine höhere Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems bei Verwendung derselben Grenzwerte wie sie in der Praxis für die isolierte Betrachtung der Knotenelemente eingesetzt werden. Dabei können insbesondere die Abhängigkeitseffekte zwischen Ein- und Ausfahrt in GFK und Verkehrshalten in der GG im Gesamtsystem dargestellt werden. So kann die Gleisgruppe beispielsweise als Warteraum für ausfahrende Forderungen genutzt werden, um den Qualitätsfaktor der GFK zu verkleinern. Umgekehrt wirken die einkanalig modellierten GFK bereits als eine Art Filter, um die an der Gleisgruppe ankommenden Forderungen zu synchronisieren.

Welche der beiden Modellierungen dabei näher an der Realität der auftretenden Warteeffekte in der Fahrplanerstellung

Die Methode bietet
Infrastrukturbetreibern erstmals
die Möglichkeit, Kennzahlen
eines gesamten Bahnhofs zu
berechnen, unabhängig von der
Anzahl der Fahrstraßen.

liegen, sollte in weiterer Forschung gesondert untersucht werden. Ein besonderer Fokus könnte dabei auf der Entwicklung von Grenzwerten zu Kennzahlen des Gesamtknotens liegen. Die hier vorgestellte Modellierung als zeitkontinuierliche Markov-Kette erlaubt dazu die Formulierung weiterer Kennzahlen, die über die klassische Warteschlangenlänge an den GFK und Wartewahrscheinlichkeit zur Nutzung der GG hinausgehen.

Mit der eingeführten Betrachtung lassen sich Kennzahlen für das Gesamtsystem berechnen, allerdings ist eine detaillierte Identifizierung von Engpässen im GFK-Bereich durch die einkanale Approximation nicht ohne weiteres möglich. Neben der Weiterentwicklung der Grenzwerte und Kennzahlen könnte deshalb auch die Entwicklung einer Zwischenstufe der Abstraktionsebenen zwischen Fahrstraßen und ganzen GFK für weitere Forschung interessant sein.

Insgesamt bietet die vorgestellte Methode Infrastrukturbetreibern erstmals die Möglichkeit zur Berechnung von Kennzahlen eines gesamten Eisenbahnknotens, unabhängig von der Anzahl der Fahrstraßen. Damit werden sie in die Lage versetzt, bereits in frühen Planungsstufen die Leistungsfähigkeit der gesamten Knoten-Infrastruktur einzuschätzen, ohne zeitaufwendige Simulationen für einzelne Fahrplan-Szenarien durchzuführen. •

Förderung

Dieser Beitrag wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) – 2236/2 gefördert.

DOI 10.61067/260533

Literatur

- [1] T. Emunds und N. Nießen, Approximation von Bediensystemen zur Leistungsfähigkeitsbestimmung von Eisenbahninfrastruktur in Bahnhöfen, in IRSA 2025: Tagungsband, Aachen: DVV Media Group, 2026, S. 44–64. doi: 10.18154/RWTH-2026-01128.
- [2] G. Pothhoff, Verkehrsströmungslehre - Die Zugfolge auf Strecken und in Bahnhöfen. Transpress, 1970.
- [3] G. Hertel, Exakte Lösung zur Berechnung der Wartegleiszahl vor im Einrichtungsbetrieb befahrenen Streckengleisen bei nicht-poisson-Ankünften (G/M/1-wartesystem), Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen, Bd. 31, S. 195–205, 1984.
- [4] W. Schwanhäuß, Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von großen Fahrstraßenknoten und von Teilen des Eisenbahnnetzes, Archiv für Eisenbahntechnik, Bd. 1978, Nr. 33, S. 7–18, Jan. 1978.
- [5] N. Nießen, Leistungskenngrößen für Gesamtfahrstraßenknoten, 2016.
- [6] T. Emunds und N. Nießen, Evaluating railway junction infrastructure: A queueing-based, timetable-independent analysis, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Bd. 165, S. 104704, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.trc.2024.104704.
- [7] T. Emunds und N. Nießen, A queueing-based approach for timetable-independent railway station performance analysis, Journal of Rail Transport Planning & Management, Bd. 36, S. 100539, Dez. 2025, doi: 10.1016/j.jrtpm.2025.100539.

[8] I. Hansen und J. Pachl, Railway timetabling and operations: Analysis, modelling, optimisation, simulation, performance, evaluation. Eurailpress, 2014.

[9] S. Junges und M. Volk, Stormpy - Python bindings for Storm: Version 1.7.0. 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://moves-rwth.github.io/stormpy/index.html>

[10] C. Hensel, S. Junges, J.-P. Katoen, T. Quatmann, und M. Volk, The probabilistic model checker Storm, Int J Softw Tools Technol Transfer, Bd. 24, Nr. 4, S. 589–610, Jan. 2022, doi: 10.1007/s10009-021-00633-z.

[11] DB Netz AG, Richtlinie Fahrwegkapazität. 2019.

[12] W. Schwanhäuß und K. Schultze, Ermittlung von Qualitätsmaßstäben für die Berechnung der Leistungsfähigkeit eines Streckenabschnittes und Entwicklung eines Rechenverfahrens zur Ermittlung von Endverspätungen: Forschungsarbeit für die Deutsche Bundesbahn. 1982.

Summary

Approximation of operating systems for determining the performance of railway infrastructure in stations

This paper presents a method for analyzing entire railway station areas. Arrival and departure processes are approximated in the overall route junction and, together with traffic stops in the track group, described in a combined queueing system. This can be represented as a continuous-time Markov chain and analyzed using probabilistic model checking. The proposed approximation enables, for the first time, the calculation of timetable-independent performance indicators for large stations.





Hybridveranstaltung 26. Signal+Draht-Kongress

12. – 13. November 2026,
Maritim Hotel, Fulda



Weitere Informationen finden Sie unter:
www.eurailpress.de/sdk2026





