

Potenziale der Lastspitzenvermeidung durch vernetzte Fahrerassistenzsysteme

Fahrerassistenzsysteme helfen Triebfahrzeugführenden, den Bahnbetrieb pünktlich und energieeffizient durchzuführen. Während die Optimierung einzelner Zugfahrten schon breit untersucht wurde, liegt der Fokus heute mehr auf Vernetzung der Systeme. Dadurch wird es möglich, ganze Zugflotten in den Blick zu nehmen. Dieser Artikel bewertet das Potenzial, Lastspitzen im Energiebezug zu reduzieren.



Problemstellung

Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) zahlen für den Energiebezug je nach Abrechnungsmodell neben dem Arbeitspreis auch einen Leistungspreis, welcher von der Jahreshöchstleistung abhängig ist. Die Jahreshöchstleistung ist der höchste im Kalenderjahr ermittelte Viertelstunden-Mittelwert des Energiebezugs über alle Triebfahrzeuge des EVU im Netzbereich [1]. Allerdings werden Rückspeisungen für das EVU separat vergütet und bei Bemessung der Lastspitze nicht berücksichtigt [1] [2]. Das EVU hat daher einen finanziellen Anreiz, Energie möglichst gleichmäßig zu beziehen und dadurch die Jahreshöchstleistung gering zu halten.

Um Lastspitzen im Energiebezug zu reduzieren, gibt es verschiedene Ansätze. So können Freiheitsgrade bei der Festlegung des finalen Fahrplans genutzt werden. In den Arbeiten von [2] und [3] konnte die 15-Minuten-Lastspitze durch leichte Anpassungen der Abfahrtszeiten um ca. 8-10% gesenkt werden. Allerdings ist nicht sicher, wie weit diese Einsparungen auf den realen Betrieb übertragen werden können. So hat [3] den optimierten Fahrplan auch für verspätete Szenarien durchgespielt und konnte für diese Fälle keine wesentliche Reduzierung der 15-Minuten-Lastspitze nachweisen.

Ein weiterer Ansatz ist der Eingriff in den laufenden Betrieb. In [4] wird eine Echtzeit-Methode vorgeschlagen, welche die Häufigkeit von Lastspitzen durch Verlängerung der Haltezeiten reduziert, ohne dass wesentliche Verspätungen entstehen.

Allerdings wurde nicht die Höhe der Lastspitze reduziert, sondern lediglich die Häufigkeit der Überschreitung.

Im mFUND-Projekt FASaN [5] wird, aufbauend auf vorherigen Arbeiten [6], ein vernetztes Fahrerassistenzsystem umgesetzt. Ein Teilziel des Projektes ist zu untersuchen, inwieweit gezielte Fahrempfehlungen (FE) dazu beitragen können, Lastspitzen im Betrieb zu verringern. Dieser Artikel stellt eine simulationsbasierte Methode zur Reduktion von Lastspitzen vor, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurde, und diskutiert die Ergebnisse eines Anwendungsfalls.

Prinzipiell sind verschiedene betriebliche Maßnahmen denkbar, um Lastspitzen zu vermeiden wie etwa:

- Entzerrtes Beschleunigen (z. B. „Anfahren mit halber Kraft“)
- Verschiebung der Ankunfts- und Abfahrtszeiten
- Haltezeitverlängerung
- Geschwindigkeitsbegrenzung (für einen Zeitraum und / oder Streckenabschnitt)
- Vermeiden von Beschleunigung im hohen Geschwindigkeitsbereich

Das entzerrte Beschleunigen ist allerdings schwerer als konkrete FE umsetzbar. Eine Verschiebung von sowohl Ankunfts- als auch Abfahrtszeit ermöglicht mehr betriebliche Freiräume als eine reine Haltezeitenverlängerung. Beschleunigungen mit hoher Geschwindigkeit können auch durch eine Geschwindigkeitsbegrenzung vermieden werden. Dieser Artikel konzentriert sich daher auf die Verschiebung der Ankunfts- und Abfahrtszeiten sowie auf



Philip Ritzer

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig
philip.ritzer@dlr.de



Dr.-Ing. Christian Meirich

Gruppenleiter Bahnbetrieb, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig
christian.meirich@dlr.de

temporäre Begrenzungen der Höchstgeschwindigkeit.

Methodik

Die hier vorgestellte Methodik basiert auf einer Simulation des Betriebsgeschehens, welche die aktuelle Fahrplanlage und die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Zügen berücksichtigt. Diese Abhängigkeiten ergeben sich zum Beispiel aus Interaktionen an eingleisigen Streckenabschnitten, Zugkreuzungen oder bei (geplanten) Überholungen.

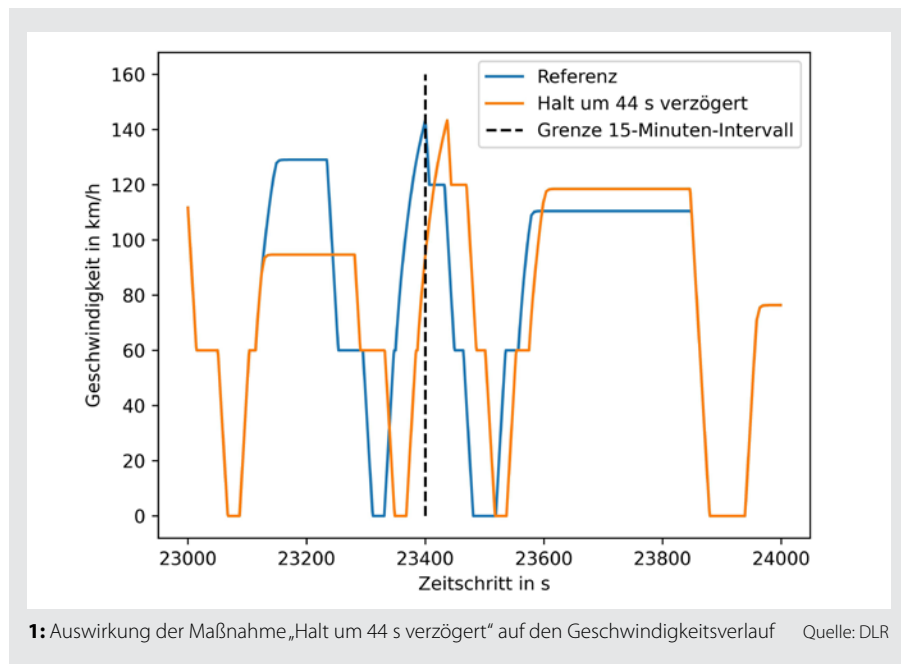
Betrachtet werden derzeit nur die Züge eines EVU. Es wird davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge mit einem Fahrerassistenzsystem ausgerüstet sind und damit ihre Position per Satellitennavigation bestimmen sowie regelmäßig versenden können. Ist die Fahrplanlage weiterer Züge bekannt, können diese in die Simulationsumgebung integriert werden. Die Begren-

zung auf Fahrzeuge des EVU stellt jedoch eine wesentliche Einschränkung dar. Optimale Fahrempfehlungen können erst dann entworfen werden, wenn alle notwendigen Informationen vorliegen [7]. Dafür muss die Position und Fahrplanlage aller relevanten Züge bekannt sein. Je nach Betrachtungsgebiet kann dies sowohl Fernverkehr und Nahverkehr anderer EVU als auch Güterverkehr und sonstige Verkehre einschließen. Während dies das Zielbild für ein vernetztes Fahrerassistenzsystem sein muss, ist die Umsetzung in der Praxis eine Herausforderung.

Die Simulation erfolgt mit SUMO [8], einem Open-Source-Softwarepaket für mikroskopische, multimodale Verkehrssimulationen. Während die Ursprünge von SUMO mehr auf der Abbildung von Straßenverkehr lagen, können mittlerweile auch die wesentlichen Aspekte des Eisenbahnverkehrs abgebildet werden [9].

Zunächst wird die Simulation mit der aktuellen Betriebslage initiiert und das zu erwartende Verhalten auf Basis des Fahrplans und der Zuginteraktionen prognostiziert. Außerdem muss der Grenzwert für eine Lastspitze festgelegt werden. Dieser beinhaltet neben der Traktionsenergie auch den Nebenverbrauch der Fahrzeuge, welcher in SUMO als konstante Leistung vorgegeben wird. Kommt es in der Auswertung zu einer Überschreitung des Grenzwertes, werden Gegenmaßnahmen entwickelt und die Ergebnisse der resultierenden Szenarien verglichen. Auswertekriterien sind die Höhe der Lastspitze und der Verspätungszuwachs (Summe aller Verspätungen).

Für die Entwicklung der Gegenmaßnahmen werden zwei Ansätze verfolgt. Im ersten Ansatz wird die Geschwindigkeit aller EVU-Fahrzeuge im kritischen 15-Minuten-Intervall auf einen Wert zwischen 100 und 155 km/h begrenzt. Im zweiten Ansatz wird untersucht, ob Halte der Züge zum Ende des Intervalls verschoben werden



können. Wenn Abfahrten innerhalb von 90 Sekunden vor Ende des Intervalls erfolgen, werden Ankunfts- und Abfahrtszeit um bis zu 90 Sekunden nach hinten verschoben, wobei die Abfahrt maximal auf Beginn des nächsten Intervalls verzögert wird.

Zur Umsetzung der soeben beschriebenen Maßnahmen wird die SUMO-Simulation über die TraCi-Schnittstelle [8] durch Python-Skripte um zwei zusätzliche Funktionen erweitert. Erstens passen die Züge ihre Geschwindigkeit in Abhängigkeit der aktuellen Fahrplanreserve an. Dadurch wirken sich geänderte Ankunftszeiten auch auf den Energieverbrauch der Züge aus. Zweitens kann die maximale Geschwindigkeit der Fahrzeuge im kritischen Intervall auf einen vorgegebenen Wert reduziert werden, was einer FE mit reduzierter Geschwindigkeit entspricht.

Ergebnisse eines Anwendungsfalls

Im Folgenden werden die Ergebnisse für einen Anwendungsfall dargestellt. Im Projekt FASaN ist die Ostdeutsche Eisenbahn GmbH (ODEG) als EVU beteiligt. Der Anwendungsfall ist angelehnt an die Fahrten der ODEG auf dem größtenteils eingleisigen Streckenabschnitt an der Ostseeküste zwischen Rostock und Stralsund (RE9/10). Als Zeitraum wird ein Wochentag zwischen 06:00 und 07:30 Uhr gewählt, an dem aufgrund einer zusätzlichen Verstärkerfahrt drei Fahrzeuge parallel im Einsatz sind und daher eine Lastspitze zu erwarten ist.

In Bild 1 ist der Geschwindigkeitsverlauf einer Zugfahrt mit verzögertem Halt gegenüber dem Referenzfall dargestellt. Der letzte Halt im kritischen 15-Minuten-Intervall (links der Intervallgrenze) ist 44 s nach hinten verschoben. Dadurch kann der verzögerte Zug den Halt mit einer niedrigeren Geschwindigkeit anfahren. Zudem kann das energieintensive Beschleunigen durch Verschieben der Abfahrtszeit zum Teil in das nächste 15-Minuten-Intervall verlagert werden. In dieser Zeitscheibe (rechts der Intervallgrenze) erreicht der verzögerte Zug den ersten Halt verspätet und fährt nach der Mindesthaltezeit auch leicht verspätet ab. Anschließend fährt der verzögerte Zug mit erhöhter Geschwindigkeit, bis er wieder gleichauf mit dem Referenzfall ist.

Bild 2 zeigt den summierten Energiebezug aller EVU-Fahrzeuge in den 15-Minuten-Intervallen. Farblich hervorgehoben sind die Änderungen der Maßnahme „Halt um 44 s verzögert“ gegenüber der Referenz. Die eingesparte Energiemenge ist hier höher als die im nächsten Intervall zusätzlich bezogene. Somit kann neben einer Reduktion der Lastspitze auch der Gesamtbezug der Energie leicht reduziert werden. Allerdings sind diese energetischen Vorzüge mit zusätzlichen Verspätungen erkauft, siehe Tabelle 1.

Die Verzögerung der Halte und die Reduktion der maximalen Geschwindigkeit werden nun gleichmäßig in den vordefinierten Grenzen variiert, wodurch Maßnahmen

Das EVU hat
einen finanziellen Anreiz,
Energie möglichst gleichmäßig
zu beziehen und dadurch
die Jahreshöchstleistung
gering zu halten.

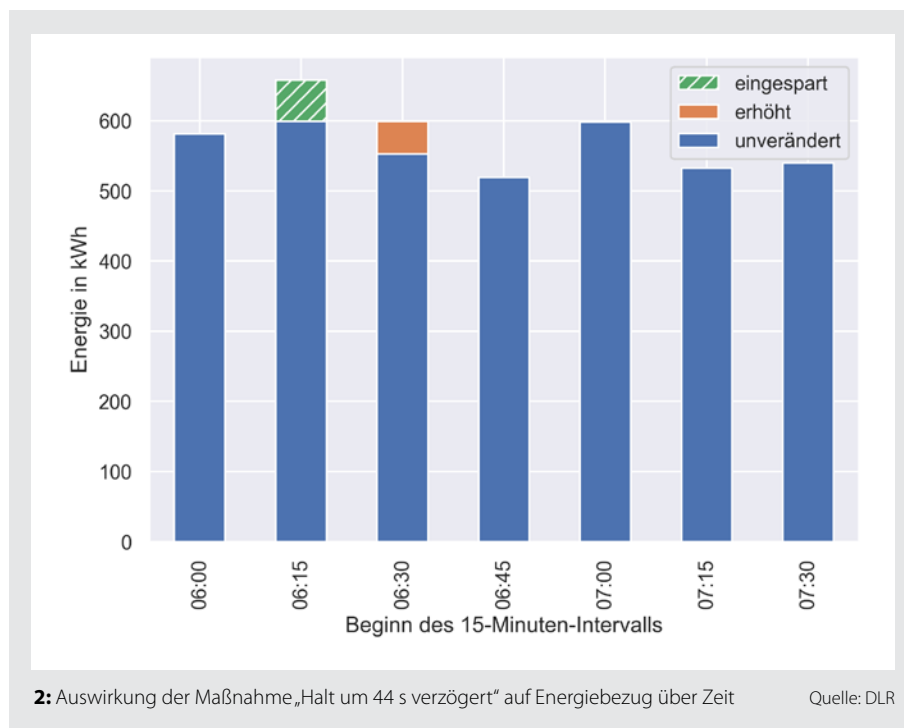


Tabelle 1: Zahlenwerte für unterschiedliche Szenarien

Art des Szenarios	Konfiguration	Lastspitze in kWh	Reduktion der Lastspitze in %	Summe der Verspätungen in s	Maximale Verspätung in s
Referenz	-	658	-	29	12
Geschwindigkeit	129 km/h	648	1,4 %	29	12
Geschwindigkeit	114 km/h	624	5,2 %	53	30
Verzögerter Halt	26 s	622	5,4 %	54	34
Verzögerter Halt	44 s	599	8,9 %	84	49
Geschwindigkeit	109 km/h	598	9,1 %	97	47

unterschiedlicher Intensität entstehen. In Bild 3 ist der Zusammenhang zwischen Verspätung und Höhe der Lastspitze dargestellt. Als Referenz wurde ein leicht verspätetes Szenario gewählt, welches in Bild 3 bei minimaler Verspätung und maximaler Lastspitze verortet ist (unten rechts).

Die Maßnahmen können mit zunehmender Intensität die Lastspitze nun immer weiter reduzieren, wobei allerdings auch die Verspätungen zunehmen. Maßnahmen über der mittleren Intensität

führen jedoch zu einem gegenteiligen Effekt. In diesem Bereich kommt es zu einer Erhöhung der Lastspitze, während die Verspätungen weiter steigen. Grund dafür ist die Verschiebung der Energie in die nächste Zeitscheibe. Durch Reduktion der Geschwindigkeit oder Verschiebung der Abfahrt wird der Zug in seiner Fahrplanlage verzögert und muss diesen Rückstand im folgenden Intervall wieder aufholen, was einen erhöhten Energiebedarf nach sich zieht. Maßnahmen hoher Intensität kön-

nen den Energiebezug im anvisierten Intervall zwar weiter reduzieren, führen aber zu weiteren Verspätungen und einer erhöhten Lastspitze im darauffolgenden Intervall.

Weiterhin ist zu beobachten, dass die Ergebnisse trotz gleichmäßiger Variation der Intensität nicht ganz gleichmäßig verteilt sind. So bewirken geringe Reduktionen der Geschwindigkeit zunächst keine oder nur geringe Änderung der Zielgrößen, da die Züge ihre maximale Geschwindigkeit im betroffenen Intervall nicht oder nur kurzzeitig ausnutzen müssen, um den Fahrplan zu erfüllen.

Interessant ist daher in Bild 3 der Schnittpunkt der Maßnahmen bei einer Lastspitze von etwa 623 kWh. Bezüglich der Verspätungssumme ist darüber die Reduktion der maximalen Geschwindigkeit attraktiver, darunter der verzögerte Halt.

Ein optimales Ergebnis wäre in Bild 3 nahe des Koordinatenursprungs zu finden, was einer minimalen Lastspitze bei minimaler Verspätung entspräche. Dieser Bereich kann jedoch nicht erreicht werden, weil nach Ausschöpfen der Fahrplanreserven jede zusätzliche Verzögerung eines Zuges zu einer zusätzlichen Verspätung führt. Allerdings ermöglicht die vorhandene Fahrplanreserve durch Reduktion der maximalen Geschwindigkeit auch eine Reduktion der Lastspitze um bis zu 1,4 % ohne dass sich die Verspätung erhöht, siehe Tabelle 1.

Diskussion

In diesem Artikel wurde ein möglicher Ansatz zur Vermeidung von Lastspitzen durch gezielte Fahrempfehlungen vorgestellt. Die grundlegende Machbarkeit konnte auf Basis von Simulationsrechnungen demonstriert werden. Allerdings hat der Ansatz auch einige Herausforderungen, die hier kurz diskutiert werden.

Eine Schwierigkeit besteht darin, den Grenzwert für eine Lastspitze festzulegen. Wird der Grenzwert zu niedrig gewählt, werden viele FE auch in weniger kritischen Situationen erzeugt, worunter eventuell auch

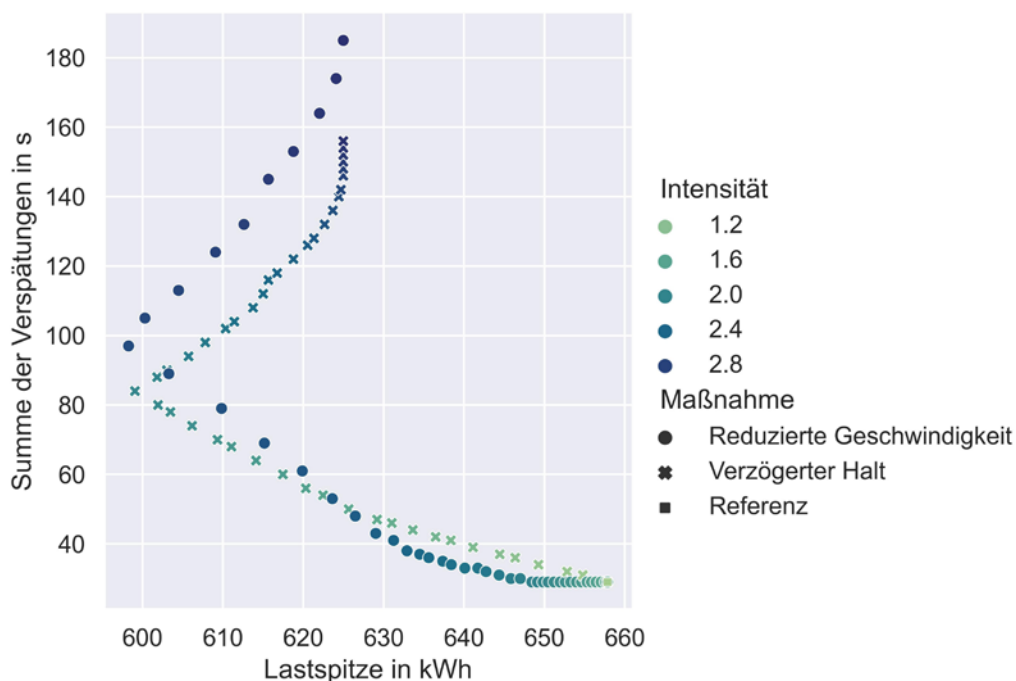
Bosch Kollisionswarnsystem für Straßenbahnen

Mehr Sicherheit im Stadtverkehr – höhere Effizienz für Bahnbetreiber



Bosch Engineering





3: Lastspitze und Verspätungen für Maßnahmen unterschiedlicher Intensität

Quelle: DLR

die Akzeptanz bei den Triebfahrzeugführern leidet. Wird der Grenzwert zu hoch gewählt, kann nicht das ganze Potenzial ausgeschöpft werden. Ein sinnvolles Vorgehen ist hier, zunächst die Lastspitzen der letzten Jahre auszuwerten und darauf basierend einen ambitionierten Grenzwert abzuschätzen. Sollte dieser Wert trotz FE überschritten werden, ist der höhere Wert nun für den Rest des Jahres ausschlaggebend.

Eine weitere Herausforderung ist es, eine der Höhe der Lastspitze angemessene Maßnahme zu entwerfen. Insbesondere für mehrere Überschreitungen des 15-Minuten-Grenzwertes wird es zunehmend komplexer, für jedes Intervall eine Maßnahme geeigneter Intensität zu entwerfen. Aufgrund der Komplexität des Betriebsablaufs ist es schwer abzuschätzen, wie sich eine konkrete Maßnahme auf die Verteilung der Energie auswirken wird. Prinzipiell kann eine große Bandbreite von Maßnahmen vorausberechnet werden und erlaubt so ein differenziertes Bild. Mit Erhöhung der Freiheitsgrade steigt jedoch die Anzahl der möglichen Maßnahmen und damit auch die Rechenzeit stark an. Zur Eingrenzung der sinnvollen Maßnahmen ist das Simulationsmodell mit einem mathematischen Optimierungsverfahren zu kombinieren, welches Fahrdynamik, Energiebezug und

resultierende Verspätungen vereinfacht abbildet. Als Zielfunktion kann die Summe der Verspätungen gewählt werden. Der Grenzwert für die Lastspitze ist dann eine zu erfüllende Randbedingung. Im Anschluss werden die Ergebnisse durch das Simulationsmodell verifiziert und die vielversprechendste Maßnahme wird als FE an die betroffenen Züge versendet.

Prinzipiell kann eine Maßnahme nach festen Kriterien ausgewählt und automatisch als FE versendet werden. Aber auch ein Einbezug der Leitstelle ist denkbar. Zeichnet sich eine Lastspitze ab, wird der Leitstelle eine Auswahl an Gegenmaßnahmen inklusive der prognostizierten Auswirkungen übermittelt. Die Leitstelle muss nun abwägen, welche Maßnahme umgesetzt werden soll und kann diese bei Bedarf noch anpassen. Nach Wahl einer konkreten

FE erfolgt die Übermittlung an die mobilen Applikationen auf den Fahrzeugen. Für die praktische Umsetzung der FE ist eine Abstufung der Maßnahmen in größeren Stufen von etwa 10 s oder 5 km/h sinnvoll. Mit einer automatisierten Zugsteuerung wird auch eine feinere Abstufung im Bereich von Sekunden oder minimaler Geschwindigkeitsunterschiede möglich, was weitere Optimierungspotenziale freisetzt.

Neben der Traktionsenergie ist der Nebenverbrauch der Fahrzeuge, insbesondere die Klimatisierung, ein weiterer Faktor, der bei der Jahreshöchstleistung entscheidend sein kann. Daher sind aktuelle Temperaturdaten zur Abschätzung des Nebenverbrauchs relevant. Nicht zuletzt ist eine Validierung der Simulation mit Daten aus dem realen Betrieb unabdingbar, um eine realistische Prognose und daraufhin eine angemessene Fahrempfehlung zu erhalten.

Fazit

Der Eingriff in den Bahnbetrieb durch Fahrempfehlung kann eine wirkungsvolle Maßnahme zur Reduktion von Lastspitzen sein, die jedoch in ihrer Umsetzung anspruchsvoll ist. Das grundsätzliche Potenzial und eine mögliche Umsetzung wurden in diesem Artikel vorgestellt. Allerdings

Allerdings ist das Potenzial der Lastspitzenreduktion durch die vorhandenen Fahrplanreserven beschränkt.

ist das Potenzial der Lastspitzenreduktion durch die vorhandenen Fahrplanreserven beschränkt. Soll die Lastspitze weiter reduziert werden, muss gegenüber zusätzlich auftretenden Verspätungen abgewogen werden. Alternativ oder ergänzend sollten daher auch andere Ansätze in Erwägung gezogen werden. Neben der Gestaltung des Fahrplans ist auch eine detaillierte Auswertung des Energiebezugs sinnvoll. Daraus können Maßnahmen hervorgehen, die

Förderhinweis

Die hier vorgestellten Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) im Programm mFUND gefördert. Die vorliegenden Inhalte sind im Rahmen des Projektes „FASaN: Fahrerassistenzsysteme adaptive Nachhaltigkeit im Bahnbetrieb“ (VKZ: 19FS2022A) entstanden.

keinen außerplanmäßigen Eingriff in den Bahnbetrieb erfordern. So könnten bspw. Leer- und Überführungsfahrten von der Leitstelle nur in unkritischen Zeitscheiben, in denen keine Spitzenlast zu erwarten ist, zugelassen werden. ●

Literatur

- [1] DB Energie GmbH, „16,7-Hz-Preisblätter Netznutzung“, 2023. <https://www.dbenergie.de/dbenergie-de/16-7-Hz-Preisblaetter-Netznutzung-4571178>.
- [2] Bärmann et al., „Efficient Formulations and Decomposition Approaches for Power Peak Reduction in Railway Traffic via Timetabling“, *Transportation Science*, 2021.
- [3] Wang et al., „Improving the Utilization of Regenerative Energy and Shaving Power Peaks by Railway Timetable Adjustment“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022.
- [4] Yang et al., „PREs: Power Peak Reduction by Real-time Scheduling for Urban Railway Transit“, *IEEE Sustainability through ICT Summit*, 2019.
- [5] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, „Fahrerassistenzsysteme adaptiv Nachhaltigkeith im Bahnbetrieb – FASaNe“, 2023. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/fasan.html>.
- [6] Meirich et al., „Erweiterung von Fahrerassistenzsysteme

men im Bahnbereich durch die Verbesserung der Datengrundlage (FAS-D)“ 2020. <https://elib.dlr.de/137684/>.

[7] Meirich et al., „Möglichkeiten und Voraussetzungen vernetzter Fahrerassistenzsysteme“, Deine Bahn, Seite 48-52, 2021.

[8] Lopez et al., „Microscopic Traffic Simulation using SUMO“, 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC, 2018.

[9] Jakob Geischberger et al., „Combining Operative Train Simulation with Logistics Simulation in SUMO“, SUMO Conference Proceedings, 2022.

Summary

Potential for peak load avoidance through networked driver assistance systems

This article presents a method that identifies possible load peaks by simulating the operational situation, derives operational countermeasures and sends these to the train drivers as driving recommendations via a driver assistance system. In this way, the railway undertaking can reduce the annual peak performance, save costs and contribute to efficient and economical railway operations.

Homepageveröffentlichung und ist genehmigt. MDR / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt. © DW media Group GmbH



Bleiben Sie in der Spur!

Mit dem Newsletter von

Eurail
press

**Jetzt
anmelden!**

[www.eurailpress.de/
anmeldung](http://www.eurailpress.de/anmeldung)