Energiesparender Betrieb unter Aufrechterhaltung des Pünktlichkeitsniveaus

Energy-saving operation while maintaining the punctuality level

Frédéric Weymann | Eike Hennig

Ein energiesparender Betrieb ist eines der wichtigsten Themen von Forschung und Entwicklung im Eisenbahnbereich, kollidiert jedoch mit anderen Zielen wie einer optimalen Betriebsqualität oder einer hohen Infrastrukturauslastung. Zukünftige Traffic Management Systeme (TMS) werden mit ihrer netzweiten Sichtweise die Auswirkungen von Entscheidungen auf das Gesamtsystem besser abschätzen und bei der Lösungssuche mehrere Ziele gleichzeitig verfolgen und gegeneinander abwägen können. In diesem Beitrag wird ein neuartiges Verfahren vorgestellt, welches die sich daraus ergebenden Potenziale untersucht.

1 Einleitung

Die Realisierung von Energieeinsparung ist ein bedeutender Weg zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit durch Kostensenkung und zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit. In der aktuellen Energiekrise hat dieses Thema weiter an Bedeutung gewonnen. Die Deutsche Bahn AG (DB) beispielsweise ist einer der größten Energieverbraucher in Deutschland und daher von der Krise besonders stark betroffen. Im Jahr 2019 wurden allein 7986 GWh an Traktionsstrom verbraucht [1].
Zur kurzfristigen Reduktion ihres Energiebedarfs haben die Bahnen verschiedene Maßnahmen umgesetzt. Die Schweizerische Bundesbahnen AG (SBB) reduziert zum Beispiel die Geschwindigkeit der Züge im Gotthard-Basistunnel und senkt die Temperatur im Fahrgastraum [2]. Bei der DB wurde ein Energiebonus für Mitarbeiter als Anreiz zum Energiesparen eingeführt [3].
Jenseits von diesen kurzfristigen Maßnahmen können insbesondere Fahrerassistenzsysteme mit Fahrempfehlungen und das automatisierte Fahren (ATO) mit dem Grade of Automation (GoA) ≥ 2 einen großen Beitrag zum Energiesparen leisten. Die Assistenzsysteme ermöglichen es, Fahrtverläufe verbrauchsoptimiert durchzuführen. Zur Vermeidung von unnötigen Brems- und Beschleunigungsvorgängen sollte im Idealfall bereits die Gesamtbetriebslage bei der Berechnung der Fahrempfehlungen berücksichtigt werden. Während bei Fahrerassistenzsystemen die Fahrempfehlungen durch den Triebfahrzeugführer (Tf) realisiert werden, stellt ATO GoA ≥ 2 sicher, dass die Empfehlungen bzw. das daraus resultierende ATO Journey Profile exakt und deterministisch abgefahren wird.
Diese Aufgabe kann nicht dezentral auf den einzelnen Fahrzeugen durchgeführt werden, sondern muss zentral von der Disposition übernommen werden. Der Energieverbrauch spielt in diesem Bereich allerdings aktuell kaum eine Rolle, der Fokus liegt zurzeit primär auf einer möglichst hohen Betriebsqualität und Kapazitätsauslastung. Eine besondere Herausforderung besteht darin, dass eine Energieeinsparung bei dem Betreiben von Zügen insbesondere durch eine Reduktion der Geschwindigkeit erreicht werden kann. Dies steht im Konflikt zu den

Energy-saving operation is one of the most important topics of research and development in the railway sector, but it collides with other goals such as optimal operational quality or high infrastructure utilisation. Future traffic management systems (TMS), with their global view, will be able to better assess the impact of decisions on the overall system and simultaneously pursue and balance several objectives when looking for solutions. This article presents a novel method that examines the resulting potential.

1 Introduction

The realisation of energy savings is a significant way of ensuring competitiveness by reducing costs and improving environmental performance. This issue has gained further importance in the current energy crisis. Deutsche Bahn AG (DB), for example, is one of the largest energy consumers in Germany and is therefore particularly affected by the crisis. In 2019, 7,986 GWh of traction power alone was consumed [1].
The railways have implemented various measures to reduce their energy demand in the short term. For example, Schweizerische Bundesbahnen AG (SBB) has reduced the maximum train speed in the Gotthard base tunnel and lowered the temperature in the passenger compartments [2]. DB has introduced an energy bonus for employees as an incentive to save energy [3].
Beyond these short-term measures, however, driver assistance systems with driving recommendations and automated driving (ATO) with a Grade of Automation (GoA) ≥ 2 in particular can make a major contribution to saving energy. The assistance systems enable driving sequences to be optimised in terms of energy consumption. The overall operating situation should ideally be considered when calculating those driving recommendations in order to avoid any unnecessary braking and acceleration. While a human engine driver implements the assistance systems' driving recommendations, ATO GoA ≥ 2 further ensures that the recommendations or ATO Journey Profile are driven precisely and deterministically.
This task cannot be carried out locally on the individual vehicles, but must be performed centrally by dispatching. However, energy consumption currently plays almost no role in this area; the focus is primarily on the highest possible operational quality and capacity utilisation. A particular challenge involves the fact that energy savings in the train operations can particularly be achieved by reducing speed. This conflicts with punctuality targets unless sufficient running time reserves and buffer times are provided in the timetable at the expense of network utilisation.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für VIA Consulting & Development GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Pünktlichkeitszielen, sofern nicht auf Kosten der Netzauslastung ausreichende Fahrzeitreserven und Pufferzeiten im Fahrplan vorgesehen werden.
TMS werden im Vergleich zur manuellen und lokalen Disposition eine netzweite Sichtweise auf den Bahnbetrieb haben, wodurch sie besser die Auswirkungen von Entscheidungen auf das Gesamtsystem abschätzen können. Sie sind außerdem in der Lage, bei der Lösungssuche mehrere Ziele gleichzeitig zu verfolgen und gegeneinander abzuwägen. Es stellt sich somit die Frage, ob sie in der Lage sein werden, den scheinbaren Widerspruch aus energiesparendem Fahren einerseits und Pünktlichkeit sowie guter Betriebsqualität andererseits aufzulösen oder zumindest bewusster auszusteuern.
Es existieren zahlreiche Untersuchungen, welche einen der oben genannten Aspekte wie Kapazitätsoptimierung, Fahrplanrobustheit oder Energieverbrauch betrachten. In diesem Beitrag stellen wir ein neuartiges Verfahren vor, welches auf Basis von Betriebssimulationen eine ganzheitliche Betrachtung ermöglicht.

2 Methodik

2.1 Basis der Simulationsumgebung

Die Studie wird mithilfe von LUKS durchgeführt, einer integrierten Software-Suite zur Realisierung verschiedener Arten von eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen (EBWU). LUKS ermöglicht die Eingabe und Bearbeitung von Stammdaten sowie von mikroskopischen Infrastruktur- und Zugdaten. Darüber hinaus ist ein nahtloser Austausch aller Daten über Standardschnittstellen möglich.
Die erfassten Daten bilden die Grundlage für die detaillierte, mikroskopische Fahr- und Sperrzeitenberechnung aller Zugfahrten. Neben den klassischen Zugsicherungssystemen können auch European Train Control System (ETCS) (unabhängig vom Level) sowie ATO-over-ETCS abgebildet werden.
Die Fähigkeiten von LUKS werden ergänzt von der neuentwickelten ATO/TMS-Toolbox, welche eine Sammlung von Verfahren zur Abbildung von Zukunftstechnologien wie ATO-over-ETCS und TMS sowie Berechnungen zum Energieverbrauch bereitstellt.

2.2 Simulation

Die LUKS-Simulation bildet durch eine enge Koppelung eines zeitsynchronen Umgebungssimulators und einer vorausschauenden Konfliktlösung die Betriebssituationen realitätsnah ab. Das Umgebungsmodul stellt den Teil des Eisenbahnbetriebs außerhalb der Betriebszentrale dar: Zugfahrten verkehren zeitgleich entsprechend einer Modelluhr durch das virtuelle Eisenbahnnetz, virtuelle Leit- und Sicherungssysteme überwachen die Züge und erzwingen bei ungelösten Belegungskonflikten außerplanmäßige Bremsvorgänge. Externe Störungen wie verspätete Ankünfte im Simulationsraum, ungeplante Haltverlängerungen oder Anlagenausfälle können eingespielt werden und führen dadurch zu einem Dispositionsbedarf.
Das Konfliktlösungsmodul überwacht die aktuelle Betriebssituation kontinuierlich und startet bei Konflikten in einem frei definierbaren Zeithorizont die Suche nach Konfliktlösungen und setzt diese um. Hier stehen zwei grundsätzliche Strategien zur Verfügung: Das Zwei-Zug-Modell und das OptDis-Verfahren. Im Zwei-Zug-Modell werden lokal optimale Lösungen betrachtet, indem Änderungen an den beiden betroffenen Zugfahrten untersucht werden. Das innovative OptDis-Verfahren verwendet dagegen mathematische Optimierungsverfahren zur netzweiten Disposition aller Züge im Zeithorizont und ist daher eine Abbildung für die möglichen Fähigkeiten eines zukünftigen TMS. Mithilfe des OptDis-Verfahrens konnte bereits erfolgreich ein Ver-

TMS will have a global view of railway operations compared to the current manual and local dispatching, which will allow them to better assess the impact of any decisions on the overall system. They are also able to pursue several objectives simultaneously and to weigh them against each other while looking for solutions. The question is whether they will be able to resolve the apparent contradiction between energy-saving driving on the one hand and punctuality and good operating quality on the other or at least to manage it more consciously. There are numerous studies that have looked at one of the aspects mentioned above, such as capacity optimisation, timetable robustness or energy consumption. This article presents a novel method that enables a holistic view based on operational simulations.

2 Methodology

2.1 The basis of the simulation environment

The study is carried out with the help of LUKS, an integrated software suite for the realisation of different types of railway operation studies. LUKS allows the input and editing of master data as well as microscopic infrastructure and train data. In addition, all the data can be seamlessly exchanged via standard interfaces.
The recorded data forms the basis for the detailed, microscopic running and blocking time calculation of all train movements. European Train Control System (ETCS) (regardless of the level) and ATO-over-ETCS can also be mapped in addition to the classic train protection systems.
The capabilities of LUKS have been complemented by the newly developed ATO/TMS toolbox, which provides a collection of procedures for mapping future technologies such as ATO-over-ETCS and TMS, as well as energy consumption calculations.

2.2 Simulation

The LUKS simulation realistically reproduces operational situations using the close coupling of a time-synchronous environment simulator and predictive conflict resolution. The environment module represents that part of railway operations that lies outside the operations centre: trains run simultaneously through the virtual railway network according to a model clock. Virtual control and safety systems monitor the trains and force unscheduled braking in the event of any unresolved occupancy conflicts. External disturbances such as delayed arrivals in the simulation area, unplanned stop extensions or system failures can be introduced and thus lead to the need for dispatching.
The conflict resolution module continuously monitors the current operational situation and, in the event of any conflicts, starts searching for and implements conflict solutions within a freely definable time horizon. Two basic strategies are available here: the two-train model and the OptDis method. In the two-train model, locally optimal solutions are considered by examining changes to the two affected train movements. The innovative OptDis method, on the other hand, uses mathematical optimisation approaches for the global dispatching of all trains within the time horizon and can therefore be seen as a representation of the potential capabilities of a future TMS. A comparison of manual and TMS-supported dispatching has already been successfully carried out with the help of the OptDis method [4].

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für VIA Consulting & Development GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

gleich von manueller und TMS-gestützter Disposition durchgeführt werden [4].

2.3 Energieberechnung

Auf Basis der in LUKS zur Verfügung stehenden Daten zur Zugkraft- und Widerstandsberechnung (Grundlagen für eine akkurate Fahrzeitrechnung) kann der Energieverbrauch am Treibrad für die in der Fahrzeitrechnung genutzte Beschleunigung bestimmt werden. Grundlegend wird dabei unterschieden zwischen Phasen, in denen Traktion aufgeschaltet ist (Beschleunigung & Konstantfahrt), und Phasen, in denen gebremst wird und somit Energie ins Netz zurückgespeist werden kann.

Die Energieberechnung wird mit der jeweils gefahrenen Geschwindigkeit durchgeführt, wodurch der Energieverbrauch der in der Simulation genutzten Konfliktlösungen bestimmt werden kann. Neben der Traktionsenergie am Treibrad können zusätzliche Energieverbräuche berücksichtigt (z. B. Heizung, Klimaanlage oder Bordstrom) und der Anteil zurückgespeister Energie definiert werden. Die verschiedenen Wirkungsgrade des Fahrzeugs werden hingegen nicht berücksichtigt. Die in der ATO/TMS-Toolbox hinterlegten Formelwerke zur Berechnung des Energieverbrauchs sind bereits in anderen Projekten erfolgreich genutzt worden.

Dank der mikroskopischen Infrastruktur-, Fahrzeug- und Zugdaten in LUKS und der darauf aufbauenden exakten, meter- und sekundengenauen Abbildung von Brems- und Beschleunigungsvorgängen in der Fahrzeitrechnung ermöglichen diese Formeln eine sehr gute Approximation des tatsächlichen Energieverbrauchs unter idealisierten Bedingungen. Sie bieten daher eine solide Basis für eine vergleichende Simulationsstudie.

2.4 Kombination der Verfahren

Die in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Ansätze wurden zu einem Gesamtsystem zur Bewertung der Auswirkung verschiedener Dispositionssysteme auf Betriebsqualität und Energieverbrauch kombiniert.

Die Zielfunktion des OptDis-Verfahrens wurde um zusätzliche Parameter zur Bewertung der effektiven Zuggeschwindigkeit ergänzt. Dies ermöglicht den Fokus der Optimierung mehr oder weniger stark auf eine Energieeinsparung durch langsameres Fahren, exaktere Bestimmung von Geschwindigkeitsprofilen und einen möglichst geringen Einsatz von Stutzen zu legen. Die manuelle Disposition musste nicht weiter angepasst werden.

Der Fokus dieser Untersuchung liegt auf den Potenzialen der Disposition, daher wird angenommen, dass eine von der Disposition an das Fahrzeug übertragende Geschwindigkeitsanpassung unverändert umgesetzt wird. Eine weitere Optimierung der Fahrweise durch das Fahrzeug oder den Tf wird nicht betrachtet. Hier bestehen weitere Potenziale, welche in weitergehenden Untersuchungen betrachtet werden sollen.

Zusätzlich wurde die Simulationsauswertung um die Energieberechnung ergänzt, so dass für jede Zugfahrt und jeden Simulationslauf der Verbrauch pro Fahrtabschnitt und gesamthaft zur Verfügung steht und nahtlos in die Bewertung einfließen kann.

3 Beispielhafte Rechnung

3.1 Infrastruktur und Fahrplan

Um die Auswirkung der Disposition eines TMS auf den Energieverbrauch und die Betriebsqualität zu bewerten, werden Betriebssimulationen auf einer ca. 80 km langen deutschen Mischverkehrsstrecke mit zwei größeren Randbahnhöfen untersucht. Auf der Untersu-

2.3 The energy calculation

The energy consumption at the driving wheel can be determined for the used acceleration in the running time calculation based on the data available in LUKS regarding the calculation of the tractive force and the resistance (the fundamentals for an accurate running time calculation). A distinction is made between the phases in which the traction is switched on (acceleration & constant speed) and the phases in which braking takes place and energy can thus be fed back into the grid.

The energy calculation is carried out with the respective speed of travel, which allows the energy consumption of the conflict solutions used in the simulation to be determined. In addition to the traction energy at the driving wheel, other energy consumption can also be taken into account (e.g. heating, air conditioning or on-board power) and the proportion of the energy fed back can be defined. However, the different vehicle efficiencies have not been considered. The formulae stored in the ATO/TMS toolbox for calculating energy consumption have already been used successfully in other projects.

Thanks to the microscopic infrastructure, vehicle and train data in LUKS and the exact, metre and second-based mapping of the braking and acceleration processes in the running-time calculation, these formulae allow a very good approximation of the actual energy consumption under idealised conditions. They therefore provide a solid basis for a comparative simulation study.

2.4 A combination of the methods

The approaches presented in the previous sections have been combined into an overall system for evaluating the impact of different dispatching systems on operational quality and energy consumption.

The objective function of the OptDis method has been extended with additional parameters to evaluate the effective train speed. This allows the optimisation to more or less focus on energy savings through slower driving, the more accurate determination of speed profiles and the smallest possible use of trimming. The manual dispatching did not have to be adapted further.

This study focuses on the potential of dispatching, so it is assumed that a speed adjustment communicated from the dispatching to the vehicle is implemented by the vehicle without any changes. No further optimisation of the driving style by the vehicle or the driver has been considered. There is further potential here, which should be considered in future investigations. In addition, the simulation evaluation has also been supplemented with an energy calculation, so that the energy consumption per journey section and overall consumption is available for each train journey and can be seamlessly incorporated into the evaluation.

3 An example calculation

3.1 The infrastructure and timetable

Operational simulations on an approximately 80 km long German mixed traffic line with two major stations have been investigated in order to evaluate the impact of the disposition of a TMS on the energy consumption and operational quality. Local and long-distance passenger trains as well as freight trains run on the investigated line at regular intervals. An energy feedback factor of 30 % for all the trains and an additional basic demand of 175 kWh per hour for passen-

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für VIA Consulting & Development GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

chungsstrecke verkehren Züge des Personennah- und Fernverkehrs sowie Güterzüge jeweils in regelmäßigen Taktlagen. Für die Berechnung des Energieverbrauchs werden für alle Züge ein Rückspeisefaktor von 30 % und ein zusätzlicher Grundbedarf von 175 kWh pro Stunde für Personenzüge angenommen.

3.2 Verglichene Ausrüstungsszenarien

Für den Vergleich von Energieverbrauch und Betriebsqualität werden die in Tab. 1 beschriebenen drei Szenarien miteinander verglichen.

3.3 Vorgehen

Analog zu [4] werden die verschiedenen Betriebssimulationen vergleichend mit der ATO/TMS-Toolbox durchgeführt. Dies bedeutet, dass Infrastruktur, Fahrplan und eingestreute Störungen in allen Szenarien identisch sind, während hingegen die Funktionalität der Disposition bzw. Konfliktlösung je Szenario entsprechend der Tab. 1 angepasst wird. Nachdem für jedes Szenario mehrere Simulationen durchgeführt worden sind, werden die Simulationsergebnisse vergleichend ausgewertet. Dabei liegt der Fokus sowohl auf der Auswertung der Betriebsqualität (hier insbesondere Ankunftspünktlichkeiten) sowie dem Energieverbrauch aller Züge im Auswertezeitraum. Durch eine Gegenüberstellung der Betriebsqualität sowie des Gesamtenergieverbrauchs können

Szenario	Disposition	Konfliktlösungs-möglichkeiten	Optimierungsziel
Szenario A: Manuelle Disposition	Zwei-Zug-Modell	• Fahrweg- / Haltezeit-änderungen	Beste Konfliktlösung für beide Züge
Szenario B: TMS Betriebs-optimierung	Globale Optimierung (TMS)	• Fahrweg- / Haltezeit-änderungen • **Biegen (Variation der Geschwindig-keit)**	Konfliktlösung mit den geringsten Folgeverspä-tungen für alle zurzeit fahrenden Züge (mit vol-ler Ausnutzung von Fahr-zeitreserven)
Szenario C: TMS Energie-optimierung	Globale Optimierung (TMS)	• Fahrweg- / Haltezeit-änderungen • **Biegen (Variation der Geschwindig-keit)**	Konfliktlösung mit den geringsten Folgeverspä-tungen für alle zurzeit fahrenden Züge (unter Einhaltung möglichst vieler Fahrzeitreserven zur Reduktion der Ge-schwindigkeit)

Tab. 1: Übersicht der verschiedenen Szenarien

Rückschlüsse auf den Einfluss der vollumfänglichen Disposition auf den Gesamtenergieverbrauch gezogen werden.

4 Ergebnisse

In dem hier genutzten Beispiel lassen sich die bereits in [4] gezeigten positiven Effekte einer TMS-Einführung auf die Betriebsqualität nachweisen. Für die Bewertung der resultierenden Betriebsqualität wird in diesem Beitrag die Verteilung der mittleren Ankunftsverspätung in Bild 1 genutzt.

In Bild 1 ist deutlich zu erkennen, dass durch ein betriebsoptimierendes TMS sowohl die mittlere Ankunftsverspätung (Kreuz innerhalb des Boxplots) als auch die Streuung der Ankunftsverspätungen (insb. das 75 % Quantil) im Vergleich zur manuellen Disposition erheblich reduziert werden kann. Wird zusätzlich auch die Veränderung des Energieverbrauchs im Vergleich zur manuellen Disposition betrachtet, fällt auf, dass durch ein betriebsoptimierendes TMS nur eine Energieeinsparung von bis zu 2 % realisierbar ist, wie in Bild 2 ersichtlich ist. Der Grund für diese verhältnismäßig geringe Energieeinsparung liegt in der Zielfunk-

ger trains has been assumed for the energy consumption calculation.

3.2 The compared equipment scenarios

The three scenarios have been described in tab. 1 in order to provide a comparison of the energy consumption and operating quality.

3.3 The procedure

Analogous to [4], the different operational simulations have been carried out comparatively using the ATO/TMS toolbox. This means that the infrastructure, timetable and introduced disturbances are identical in all scenarios, while the functionality of the dispatching or conflict resolution has been adapted per scenario according to tab. 1. The simulation results are evaluated comparatively once several simulations have been carried out for each scenario. The focus is on evaluating the operational quality (particularly arrival punctualities in this case), as well as the energy consumption of all the trains in the evaluation period. By comparing the operating quality and the total energy consumption, conclusions can be drawn about the influence of any full-scale dispatching on the total energy consumption.

Scenario	Dispatching	Conflict resolution options	Optimisation objective
Scenario A: Manual dispatching	Two-train model	• Route / stopping time changes	Best conflict resolution for both trains
Scenario B: Operation-optimising TMS	Global optimisation (TMS)	• Route / stopping time changes • **Bending (variation of speed)**	Conflict resolution with the least secondary delays for **all trains** currently running (with **full utilisation** of running time reserves)
Scenario C: Energy-opti-mising TMS	Global optimisation (TMS)	• Route / stopping time changes • **Bending (variation of speed)**	Conflict resolution with the least secondary delays for **all trains** currently running (while maintaining **as many running-time reserves** as possible to reduce the speed)

Tab. 1: An overview of the investigated scenarios

4 Results

The example used here demonstrates the positive effects of the introduction of TMS on the operational quality, as has also been shown in [4]. The distribution of the average arrival delay in fig. 1 has been used in this article to evaluate the resulting operating quality.

Fig. 1 clearly shows that dispatching with an operation-optimising TMS can significantly reduce both the average arrival delay (the cross within the box plot) and the dispersion of any arrival delays (especially the 75 % quantile) compared to manual dispatching. If the change in energy consumption is also considered in comparison to manual dispatching, it is noticeable that an energy saving of only up to 2 % can be achieved through dispatching with an operation-optimising TMS, as can be seen in fig. 2. The reason for this relatively low energy saving lies in the objective function and the fact that as few deviations as possible from the target timetable should occur in the overall system. Accordingly, the maximum number of delays is reduced by

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für VIA Consulting & Development GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

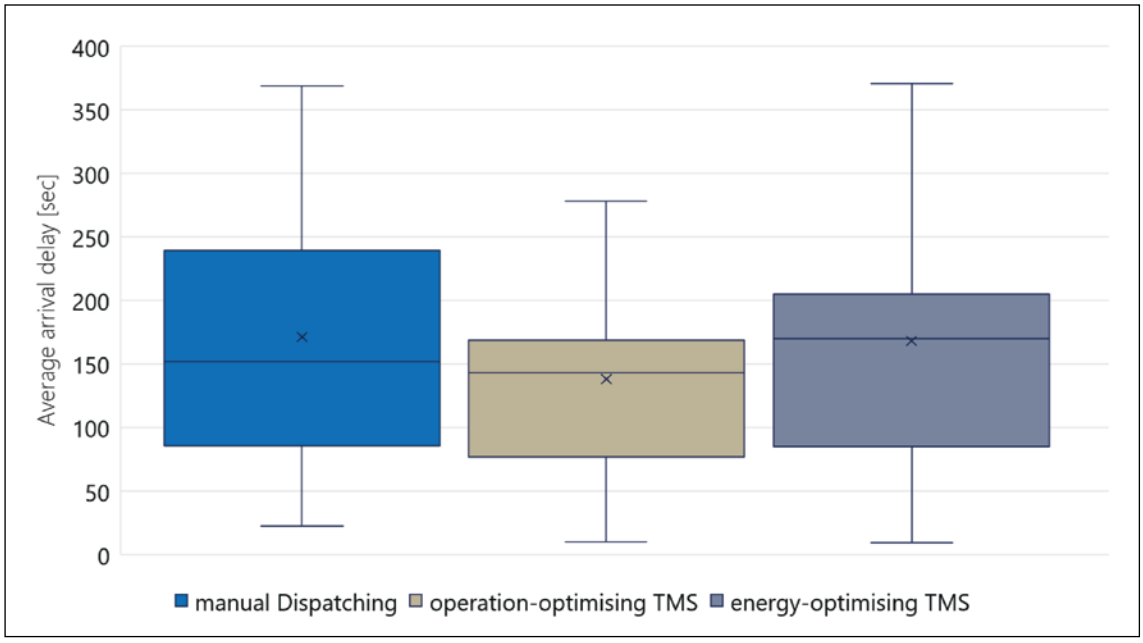

Bild 1: Verteilung der mittleren Ankunftsverspätung
Fig. 1: Distribution of the average arrival delay

tion und dem Fakt, dass hierbei im Gesamtsystem so wenig Abweichungen zum Sollfahrplan wie möglich entstehen sollen. Dementsprechend werden möglichst viele Verspätungen durch das Ausfahren des maximalen Geschwindigkeitsprofils abgebaut, was mit einem höheren Energieverbrauch einhergeht.

Die Daten des energieoptimierenden TMS zeigen zusätzlich, dass die Zielfunktion eines TMS so angepasst werden kann, dass eine ähnliche Betriebsqualität wie bei der manuellen Disposition erzielt werden kann (Bild 1). Zusätzlich ist bei der Auswertung des Energieverbrauchs ersichtlich, dass bei dem energieoptimierenden TMS eine Energieeinsparung von ungefähr 4 % bei gleichbleibender Betriebsqualität im Vergleich zur manuellen Disposition möglich ist (Bild 2). Hiermit kann nachgewiesen werden, dass ein global optimierendes TMS, welches bei einer Konfliktlösung alle Züge berücksichtigt und Vorgaben zum

running the maximum speed profile, which is associated with higher energy consumption.

The data from the scenario where dispatching is used with an energy-optimising TMS additionally shows that the objective function of a TMS can be adapted in such a way that a similar operational quality can be achieved as with manual dispatching (fig. 1). In addition, the evaluation of the energy consumption has shown that an energy saving of approximately 4 % is possible with the dispatching of an energy-optimising TMS compared to manual dispatching, while maintaining the same operational quality (fig. 2). This proves that a globally optimising TMS, which takes all the trains into account when resolving conflicts and is capable of calculating driving recommendations (especially communicating the advised speeds), can make a contribution to energy savings. In ad-

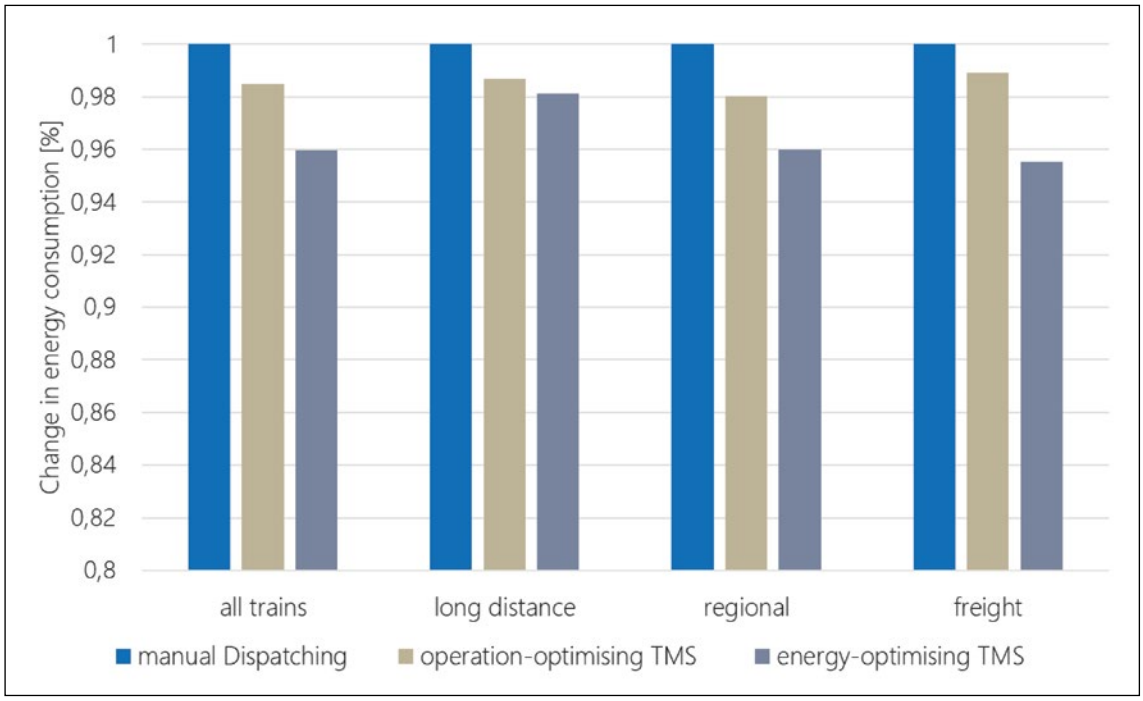

Bild 2: Veränderung des Energieverbrauchs
Fig. 2: A change in the energy consumption

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für VIA Consulting & Development GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Rail BUSINESS + bahn manager

DAS WIRTSCHAFTSMAGAZIN FÜR DEN SCHIENENSEKTOR

JETZT NEU!

Jedes Rail Business-Abo enthält ab sofort den bahn manager

IHR DOPPELPACK FÜR NACHRICHTEN DER BAHNBRANCHE:

- Rail Business liefert Ihnen wöchentlich die **wichtigsten Nachrichten** aus dem gesamten Schienenverkehrsmarkt.
- Der bahn manager ergänzt das Angebot im zweimonatigen Rhythmus mit **fokussierten Marktentwicklungen** und lässt Branchenakteure zu Wort kommen.
- Mit dem Zugriff auf das **Eurailpress-Archiv** sowie auf **erweiterte Inhalte** von Rail Business und bahn manager auf www.eurailpress.de sind Sie jederzeit direkt und schnell informiert.

Weitere Informationen: **www.eurailpress.de/rail-business**

Homepage-Copyright: © DVV Media Group GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt.

DVV Media Group

Eurailpress

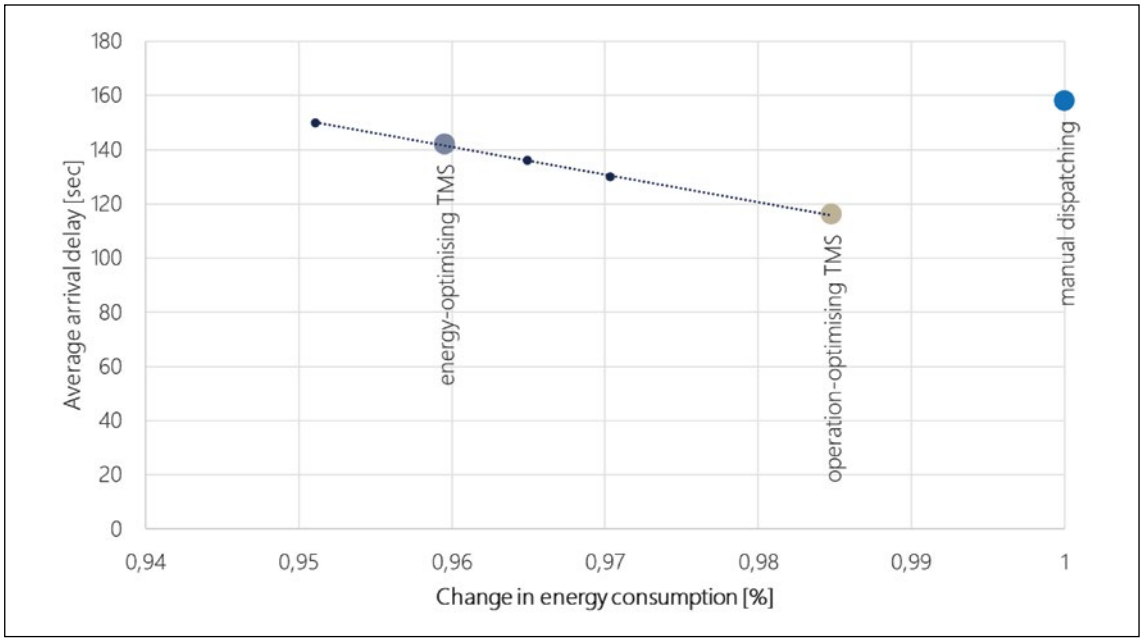

Bild 3: Zusammenhang zwischen Betriebsqualität und Energieverbrauch
Fig. 3: Relationship between the operational quality and energy consumption

Ausfahren des Geschwindigkeitsprofils geben kann, einen Beitrag zur Energieeinsparung liefern kann. Zusätzlich ist ersichtlich, dass bei der Definition der Zielfunktion eines TMS eine Abwägung zwischen Betriebsqualität und Energieverbrauch vorgenommen werden muss.
Bei der Bearbeitung der hier vorgestellten Fragestellung sind ergänzende Parametrisierungen der TMS-Zielfunktion untersucht worden. Es zeigt sich in Bild 3, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der resultierenden Betriebsqualität (hier mittlere Ankunftspünktlichkeit) und der relativen Veränderung des Energieverbrauchs im Vergleich zur manuellen Disposition besteht. Dies unterstützt die vorherige Erkenntnis, dass sowohl Energieverbrauch als auch Betriebsqualität bei der Definition der Zielfunktion für ein global optimierendes TMS zu berücksichtigen sind.
Um die Energieeinsparungen in Relation zu setzen, wird ein kurzer plakativer Vergleich vorgenommen. Im Jahr 2019 speiste die DB Netze Energie knapp 8000 GWh Traktionsenergie ein. (Eine Unterscheidung nach Brutto-/Nettostrommenge sowie der Berücksichtigung von Wirkungsgraden wird hier vernachlässigt.) Eine Energieeinsparung von 2 bis 4 % würde demnach zwischen 160 und 320 GWh Energie pro Jahr einsparen. Damit könnte innerhalb eines Jahres so viel Energie gespart werden, dass der Aachener Weihnachtsmarkt 500-1000 Jahre oder das Münchener Oktoberfest 50-100 Jahre lang mit Energie versorgt werden könnte [5, 6].

5 Zusammenfassung & Fazit

Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass ein TMS mit einer netzweiten Sichtweise einen erheblichen positiven Effekt auf die Betriebsqualität hat. Zusätzlich zeigt die Auswertung des Energieverbrauchs, dass der scheinbare Widerspruch aus energiesparendem Fahren und einer guten Betriebsqualität nicht existiert, wenn die Disposition im Kontext einer netzweiten Konfliktlösung durchgeführt wird. Daraus lässt sich schließen, dass global agierende Konfliktlösungen in der Lage sind, eine Betriebssituation im Hinblick auf zwei prinzipiell entgegengesetzte Ziele zu optimieren. Dies sollte als Anlass gesehen werden, die Zielfunktionen von netzweit agierenden Konfliktlösungen gemäß dem Aspekt der Energieoptimalität zu hinterfragen. Einer der Hauptgründe dafür, dass ein TMS zur Energieeinsparung beitragen kann, ist der Fakt, dass die Disposition vorausschauend

dition, it can also be seen that a trade-off must be made between operational quality and the resulting energy consumption when defining the objective function of a TMS.
Supplementary parameterisations of the TMS objective function have been investigated when addressing the issue presented here. Fig. 3 shows that there is a linear relationship between the resulting operational quality (the average arrival punctuality in this case) and the relative change in energy consumption compared to manual dispatching. This supports the previous finding that both the energy consumption and the operational quality must be taken into account when defining the objective function for a globally optimising TMS.
A striking brief comparison can be made to put the energy savings into perspective. In 2019, DB Netze Energie fed in just under 8,000 GWh of traction energy. (No differentiation according to the gross/net electricity quantity or consideration of any efficiencies has been made here). An energy saving of 2 to 4 % would therefore save between 160 and 320 GWh of energy per year. This means that enough energy could be saved within one year to supply the Aachen Christmas market with energy for 500-1000 years or the Munich Oktoberfest for 50-100 years [5, 6].

5 Summary & conclusion

It can be concluded from the results that a TMS with a global view can have a significant positive impact on operational quality. In addition, the energy consumption evaluation has shown that the apparent contradiction between energy-saving train driving and good operational quality does not exist when dispatching is carried out within the context of a global conflict resolution. It can be concluded from this that a global conflict resolution is able to optimise an operational situation with regard to two principally opposing goals. This should be seen as a reason to question the objective functions of global conflict resolutions according to the aspect of energy optimisation.
One of the main reasons that a TMS can contribute to energy saving is the fact that dispatching is carried out in a forward-looking manner and conflicts can be resolved by means

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für VIA Consulting & Development GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

durchgeführt wird und Konflikte durch eine detaillierte Anpassung des zu fahrenden Geschwindigkeitsprofils gelöst werden können. Damit solche Konfliktlösungen in der Realität umgesetzt werden können, wird in der Regel mindestens ein Fahrerassistenzsystem zur Übertragung und Visualisierung der geplanten Konfliktlösung benötigt. Solch ein Fahrerassistenzsystem kann die erste Vorstufe für die Einführung von ATO GoA ≥ 2 sein.

Mit der hier gezeigten Studie kann argumentiert werden, dass der erste Schritt zur Energieeinsparung im täglichen Eisenbahnbetrieb in einer vorausschauenden Disposition liegt. Durch die Überführung der Dispositionsmaßnahmen in Fahrempfehlungen für das Fahrpersonal wird die Voraussetzung geschaffen, Konflikte durch explizite Geschwindigkeitsempfehlungen zu lösen, wie in der präsentierten Beispielstudie angenommen.

Der nächste Schritt im Hinblick auf weitere Energieeinsparpotenziale ist die gezielte Energieoptimierung einer jeden Trasse. Dazu müssen in der Disposition alle relevanten Zwangspunkte jeder Trasse identifiziert werden. Aus diesen Zwangspunkten entsteht ein Trassenschlauch räumlicher und zeitlicher Ausdehnung, in dem die Lage einer Trasse vom Fahrzeug eigenständig variiert werden kann, ohne dadurch Einfluss auf andere Trassen zu nehmen. Alternativ kann innerhalb dieses Trassenschlauchs durch globale Optimierung ein Geschwindigkeitsprofil mit dem geringsten Energieverbrauch bestimmt werden.

Die hier gewonnenen Erkenntnisse aus der netzweiten Disposition in Kombination mit der Energieoptimierung einer jeden Trasse können als Grundlage für die Erzeugung von ATO-Journey-Profiles und Timing Points dienen. Gemäß dem präsentierten Ansatz kann damit sowohl eine Steigerung der Betriebsqualität als auch eine Reduktion des Energieverbrauchs realisiert werden. ■

of a detailed adjustment of the driven speed profile. The implementation of such conflict resolution in reality usually requires at least a driver assistance system to transmit and visualise the planned conflict resolution. Such a driver assistance system can constitute the preliminary stage for the introduction of ATO GoA ≥ 2.

The study shown here can be used to argue that the first step towards energy saving in daily railway operations is predictive and global dispatching. The transfer of the disposition measures into the driving recommendations for the driving personnel creates the prerequisite to resolve conflicts using explicit speed recommendations, as assumed in the presented example study.

The next step with regard to further energy saving potential involves the targeted energy optimisation of each train path. For this purpose, all the relevant constraints on each train path must be identified in the scheduling. A train path tube of spatial and temporal extension can be created with these constraints, so that the position of the train path can be varied independently by the vehicle without thereby influencing any other train paths. Alternatively, a speed profile with the lowest energy consumption can be determined within this path tube by means of global optimisation.

The knowledge gained here from the global disposition in combination with the energy optimisation of each path can serve as the basis for the generation of ATO journey profiles and timing points. Both an increase in operational quality and a reduction in energy consumption can therefore be realised according to the presented approach. ■

LITERATUR | LITERATURE

[1] Kleine Anfrage „Energieverbrauch der Deutschen Bahn", Drucksache 19/24799, Deutsche Bundestag, 27.11.2020
[2] https://www.eurailpress.de/nachrichten/betrieb-services/detail/news/schweiz-sbb-will-zum-energiesparen-tempo-im-gotthard-tunnel-reduzieren.html
[3] https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/deutsche-bahn-will-beschaeftigte-mit-100-euro-bonus-zum-energiesparen-motivieren-a-aeae79bf-3116-4c81-884c-5e34c88e6809
[4] Weymann, F.; Hennig, E.; Büker, Th.: Nutzenbewertung von TMS/ATO und weiteren Innovationen mittels Simulationsverfahren, ETR, 6/2022
[5] Ökostrom für Aachener Weihnachtsmarkt, STAWAG, 05.11.2019, https://www.stawag.de/ueber-uns/presse/aktuelles/pressemeldungen/oekostrom-fuer-aachener-weihnachtsmarkt/
[6] Hoffmann, N.; Billina, L.: Oktoberfest zu Krisenzeiten? So viel Energie schluckt die Wiesn – „Und wir alle sollen sparen", tz, 13.07.2022

AUTOREN | AUTHORS

Dr. Frédéric Weymann
Senior Software Engineer
quattron management consulting GmbH /
VIA Consulting & Development GmbH
Anschrift / *Address*: Römerstraße 50, D-52064 Aachen
E-Mail: f.weymann@via-con.de

Eike Hennig, M. Sc.
Senior Ingenieur
quattron management consulting GmbH /
VIA Consulting & Development GmbH
Anschrift / *Address*: Römerstraße 50, D-52064 Aachen
E-Mail: e.hennig@via-con.de

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für VIA Consulting & Development GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH