

# Pünktlichkeit spart Energie – Modellierung von Einflussfaktoren auf den Bahnenergiebedarf

Julius Bosch, Zollikofen (CH)

In einer Fallstudie wird anhand des Bahnnetzes der SBB nachgewiesen, dass bei zunehmender Pünktlichkeit der Bahnenergiebedarf sinkt. Hauptursachen dafür sind der Rückgang der Trassenkonflikte und die energiesparendere Fahrweise bei einer pünktlicheren Betriebslage. Angesichts dieser Erkenntnis stellt sich die Frage, ob Energiezähler auf den Fahrzeugen einen Zielkonflikt verursachen. Die Methode wird durch eine mathematische Beschreibung des Näherungsverfahrens verallgemeinert und kann dann auch zur Prognose der Bahnstromlast eingesetzt werden.

**PUNCTUALITY SAVES ENERGY – MODELLING OF FACTORS INFLUENCING RAILWAY POWER DEMANDS**  
 In a case study, it has been verified by means of the railway network of SBB (Swiss Federal Railways) that the railway power demand decreases in line with an increasing punctuality. The main reasons for this are the reduction of train path conflicts and a more energy-saving manner of driving with a more punctual operational situation. In view of this finding, the question arises whether energy counters on the vehicles cause a conflict of objectives. The method is generalised by a mathematical description of the approximation method and can then also be used to give a forecast for the railway power load.

**DES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE GRACE A LA PONCTUALITÉ – LA MODÉLISATION DES FACTEURS INFLUENÇANT LES BESOINS EN ÉNERGIE DES CHEMINS DE FER**  
 Une étude de cas a démontré à l'exemple du réseau ferré CFF que lorsque la ponctualité des trains augmente, les besoins en énergie diminuent. Les principales raisons en sont la diminution des conflits de sillon et une conduite économisant l'énergie avec une ponctualité accrue. Au vu de ce constat, la question se pose de savoir si les compteurs d'énergie installés sur les véhicules causent un conflit d'objectifs. La méthode est généralisée par une description mathématique de l'approche et peut être utilisée aussi pour la prévision des charges de courant.

## 1 Einführung

Dass der Zugfahrplan und bestimmte Witterungseinflüsse den Energiebedarf eines Bahnsystems beeinflussen, ist offensichtlich. Der Zusammenhang mit

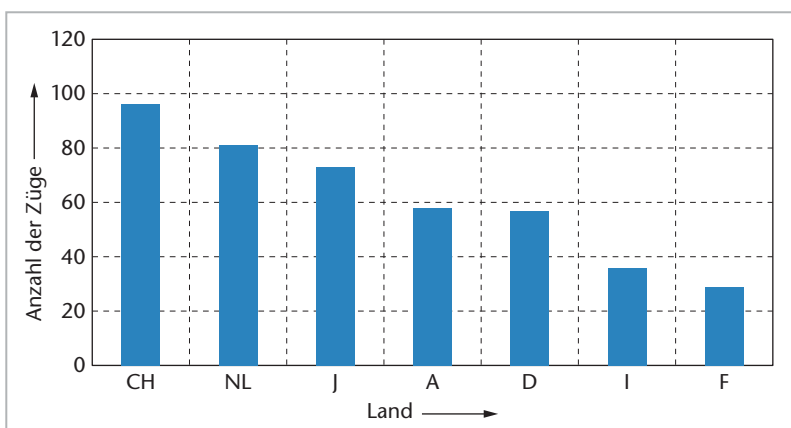
der Temperatur wurde bereits in [1] behandelt, er kommt vornehmlich über die Heizung und Kühlung der Fahrzeuginnenräume und die Heizung der Weichen zum Tragen.

Es wird vermutet, dass sich auch die Betriebslage, im Sinne der Zugpünktlichkeit, auf den Energiebedarf des Bahnsystems auswirkt. Da der Einfluss der Pünktlichkeit aber von den wesentlich stärkeren Faktoren Fahrplan und Temperatur überlagert wird, bedarf es einer Methode, um den Einfluss der Pünktlichkeit extrahieren zu können. Im Folgenden werden anhand einer Fallstudie die Zusammenhänge und Ursachen verdeutlicht, anschließend wird eine allgemeine mathematische Beschreibung der Aufgabe formuliert.

## 2 Begriffsdefinitionen

### 2.1 Zugpünktlichkeit

Bei den einzelnen Bahnen in Europa existieren verschiedene Definitionen der Zugpünktlichkeit. Teilwei-



**Bild 1:** Nutzungseffizienz der Bahninfrastruktur nach Ländern; Anzahl Züge pro Hauptgleis und Tag (Grafik nach Werten aus [3]).

se werden Züge noch mit einer Verspätung von 5 min und 59s als pünktlich bezeichnet [2]. Im Folgenden wird die relative Zugpünktlichkeit <3 min des Personenverkehrs herangezogen; das bedeutet, es wird an den Messpunkten beobachtet, welcher Anteil der Personenzüge vorzeitig, pünktlich oder gegenüber dem Fahrplan bis maximal 2 min und 59s verspätet ankommt. Beträgt zum Beispiel die Zugpünktlichkeit 97%, kamen 3% der Personenzüge des Tages mit 3 min oder mehr Verspätung an. Die Pünktlichkeit der Güterzüge wird nicht berücksichtigt.

## 2.2 Tagesenergiebedarf

Als Tagesenergiebedarf wird das Integral über die in 24h erzeugte Gesamtleistung des Bahnstromnetzes bezeichnet, korrigiert um den Austausch von Leistung über Kuppelstellen mit Nachbarnetzen.

## 2.3 Nutzungsdichte

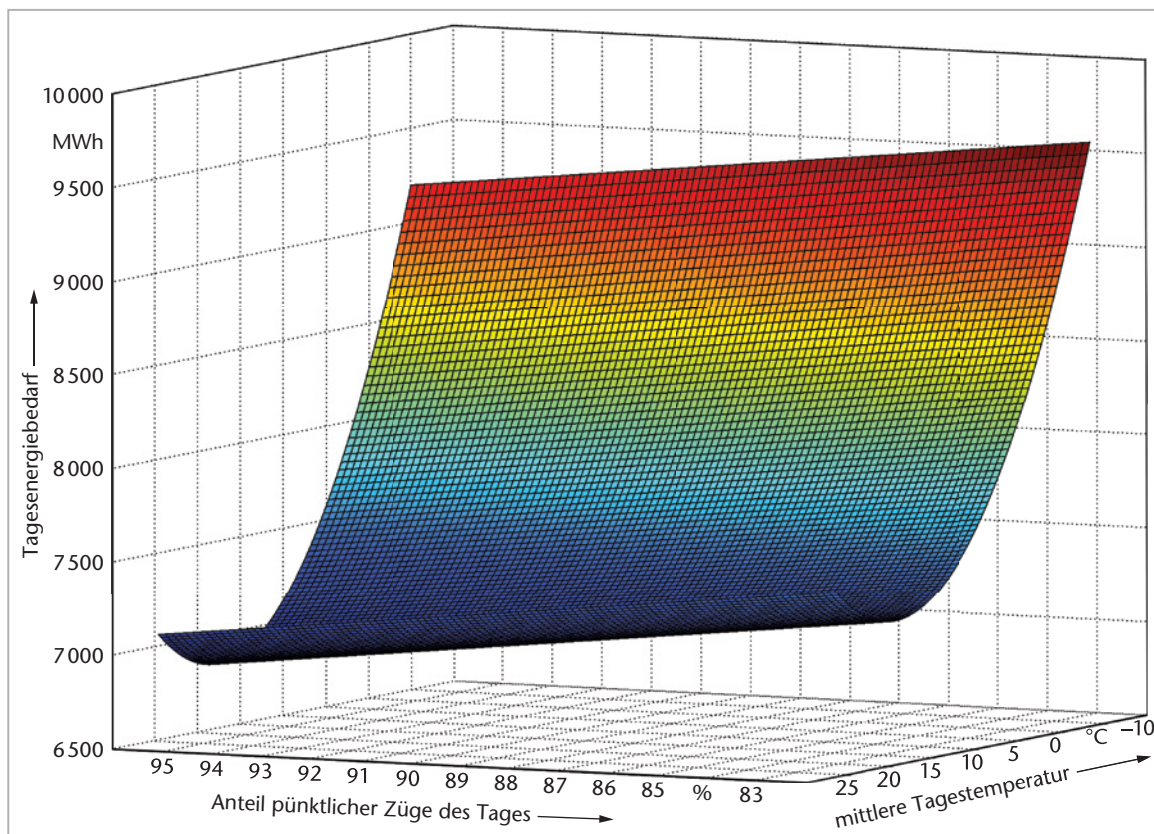
Die Nutzungsdichte ist die Anzahl der Züge, die durchschnittlich an einem Werktag pro Hauptgleis verkehren. Auf dem schweizerischen Eisenbahnnetz verkehrten im Jahr 2012 durchschnittlich 97 Züge pro

Hauptgleis und Tag [3]. Bild 1 zeigt dazu den Vergleich mit der Nutzungsdichte in den Niederlanden, Japan, Österreich, Deutschland, Italien und Frankreich.

## 3 Ergebnisse der Fallstudie im SBB-Netz

Am Beispiel des Bahnnetzes der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) wird der Einfluss der Zugpünktlichkeit auf den Energiebedarf ermittelt. Als Grundlage dienen die Messwerte des Tagesenergiebedarfs des Bahnstromnetzes und die jeweiligen mittleren Tagestemperatur- und Zugpünktlichkeitswerte. Zum Ermitteln des Pünktlichkeitseinflusses müssen vorweg die stärkeren Einflüsse des Fahrplans und der Temperatur eliminiert werden.

Zunächst wird der Fahrplaneinfluss eliminiert, indem Tage mit ähnlichem Fahrplan selektiert werden. Hier werden jeweils die Tage Dienstag bis Donnerstag der Fahrplanperiode 2013 herangezogen. Nicht berücksichtigt werden Montage und Freitage, da an den Grenzen zum Wochenende der Güterverkehr reduziert ist, sowie außerdem Tage mit besonderem Fahrplan des Personenverkehrs, wie zum Beispiel Feiertage und Ferientage.



**Bild 2:**

Perspektivische Darstellung der dreidimensionalen Funktion des Tagesenergiebedarfs  $E_p$  in Abhängigkeit von der Betriebslage hinsichtlich Pünktlichkeit und von der mittleren Temperatur (Bilder 2 bis 5: Autor).

Anschließend werden die Einflüsse der Temperatur und der Pünktlichkeit mit dem in Abschnitt 5 beschriebenen Verfahren ermittelt. Die Näherung des Tagesenergiebedarfs in Abhängigkeit von Temperatur und Pünktlichkeit zeigt in einer dreidimensionalen Funktion in perspektivischer Ansicht Bild 2. Besonders deutlich sticht zwar naturgemäß der mit sinkender Temperatur wegen Kühlung und Heizung zunächst fallende und dann stark steigende Energiebedarf ins Auge, aber klar zu erkennen ist auch der Trend zu mehr Energie bei zunehmender Zahl unpünktlicher Züge.

Des Weiteren können die einzelnen Einflussfaktoren jeweils getrennt voneinander unter Normierung des jeweils anderen, nicht aufgeführten Einflussfaktors dargestellt werden (Bilder 3 und 4). In einem Fehlerhistogramm wird die Abweichung der Näherungsfunktion zu den einzelnen gemessenen Werten aufgetragen (Bild 5); daraus lässt sich die Standardabweichung mit 221 MWh berechnen.

Die durchschnittliche Pünktlichkeit betrug bei den ausgewerteten Werktagen 91,3%. Würde diese durchschnittliche Pünktlichkeit um fünf Pro-

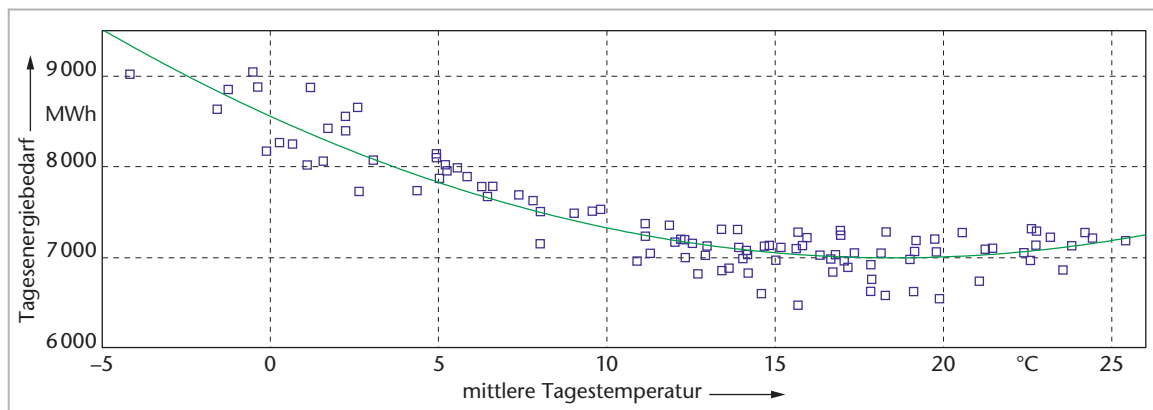
zentpunkte steigen, könnten pro Tag 147 MWh Energie gespart werden; das sind 2,0% des durchschnittlichen Bahnenergiebedarfs. Mit der gesparten Energie könnten rund 9 500 Haushalte versorgt werden, bei einem jährlichen Energiebedarf von 18 333 GWh für alle 3,25 Mio. schweizer Haushalte [4; 5]. Bei einem Bahn-Energiepreis von 0,11 CHF pro kWh würde die eingesparte Energie einem monetären Gegenwert von 16 000 CHF an einem solchen Tag entsprechen.

## 4 Ursachen für die Minderung des Energiebedarfs

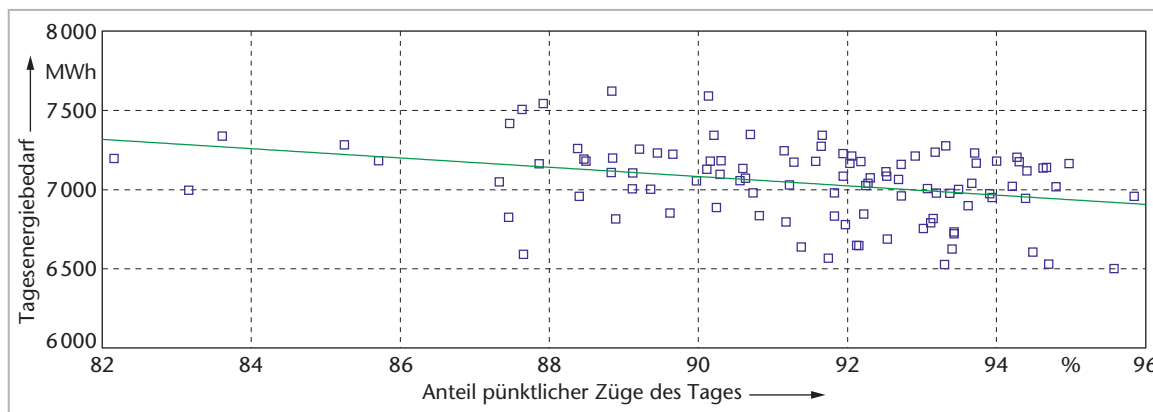
Die Ursachen für den aufgrund einer pünktlichen Betriebslage geringeren Energiebedarf des Bahnsystems sind mehrschichtig, so insbesondere

- vermiedene Trassenkonflikte und
- energieeffizientere Fahrweise.

Dominierend ist, dass sich pünktliche Züge gegenseitig weniger beeinflussen. Durch eine pünktliche-



**Bild 3:** Bahnenergiebedarf  $E_p$  des Tages in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur unter Normierung des Pünktlichkeitseinflusses.



**Bild 4:** Bahnenergiebedarf  $E_p$  aller Züge des Tages in Abhängigkeit von dem Anteil der pünktlichen Züge unter Normierung des Temperatureinflusses.

re Betriebslage verursachen die Züge weniger Trassenkonflikte mit anderen Zügen, der Bahnverkehr wird flüssiger. Trassenkonflikte entstehen, wenn ein verspäteter Zug Blockabschnitte nicht rechtzeitig für folgende Züge freigibt, sodass für diese zusätzliche, nicht im ursprünglichen Fahrplan vorgesehene Verzögerungsvorgänge oder Signalhalte mit sodann anschließenden Beschleunigungsvorgängen anfallen. Wird der durch einen verspäteten Zug beeinträchtigte Zug über seine Fahrplanreserve hinaus verspätet, entsteht eine sogenannte *Sekundärverspätung*.

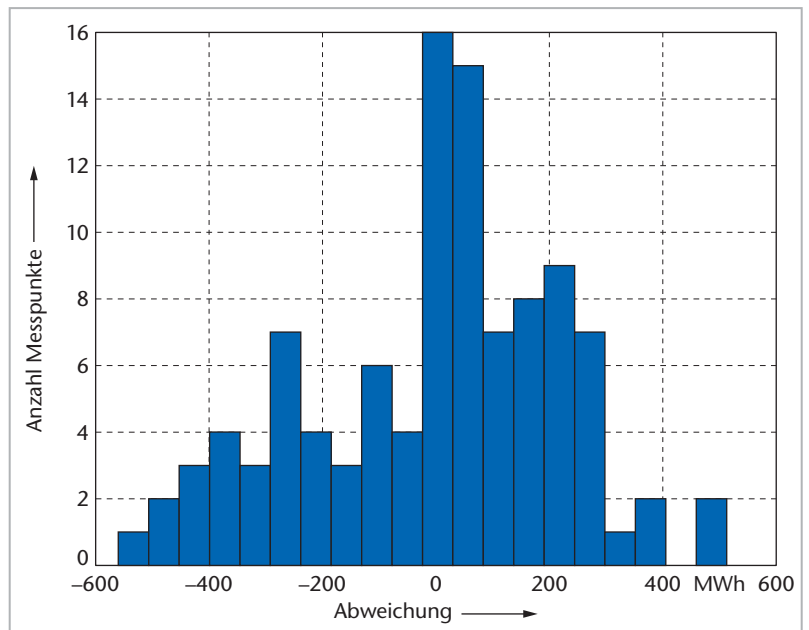
Bei Pünktlichkeit können die Lokomotivführer(innen) sanfter und somit energieeffizienter fahren. Bei Verspätungen hingegen müssen die zulässigen Streckengeschwindigkeiten voll ausgenutzt werden, um so bald wie möglich wieder pünktlich zu werden; dazu muss stark beschleunigt und gebremst werden. Bei der stärkeren Bremsung kann aufgrund der kürzeren Dauer des Bremsvorgangs nur entsprechend weniger Energie durch die Rekuperationsbremse rückgespeist werden; dafür wird durch die mechanische Bremse mehr kinetische Energie in Abwärme verwandelt. Dies hat auch die Folge, dass der mechanische Verschleiß an den Bremsen zunimmt. Untergeordnet ist der Effekt, dass eine forcierte Beschleunigung höhere Fahrleitungs-, Transformator-, Fahrmotor- und Luftreibungsverluste verursacht.

Da davon ausgegangen wird, dass die gegenseitige Beeinflussung der Züge ab 3 min Verspätung deutlich zunimmt, wird die Zugpünktlichkeit mit einem Grenzwert von 3 min als geeignetes Maß angenommen. Aufgrund der hohen Nutzungsdichte des schweizerischen Bahnnetzes ist die gegenseitige Beeinflussung der Fahrzeuge im Verspätungsfall hoch; folglich ergibt sich auch ein signifikanter Zusammenhang zwischen Pünktlichkeit und Energiebedarf.

Im folgenden Abschnitt wird die verallgemeinerte Methode mathematisch beschrieben, die Schlussfolgerungen werden dann in Abschnitt 7 behandelt.

## 5 Näherungsverfahren zur Modellierung von Einflussfaktoren auf den Bahnenergiebedarf

Die Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch werden iterativ, ausgehend vom größten hin zum kleinsten Einflussfaktor, durch eine Funktion, in diesem Fall ein Polynom, genähert und normiert. Als Grundlage dient eine Anzahl  $s$  an Stützstellen, an denen jeweils der messtechnisch ermittelte Energiebedarf  $E_f$  und die jeweils zugehörigen Werte der Einflussfaktoren  $(x_{1,f}; x_{2,f}; \dots; x_{m,f})$  vorliegen. Zur Initialisierung wird  $E_{z,1}$  gleich  $E_f$  gesetzt.



**Bild 5:**

Fehlerhistogramm der Näherung des Energiebedarfs mit der dreidimensionalen Funktion: Anzahl der Messpunkte je Abweichungsklasse.

In der ersten Iterationsstufe ( $k=1$ ) wird der Energieverbrauch durch ein Polynom den  $s$  Stützstellen des größten Einflussfaktors angenähert entsprechend der Gleichung (1) in der Tabelle.

Zunächst muss der Grad des Polynoms  $n_k$  gewählt werden; dieser sollte jedoch nicht zu hoch bestimmt werden, da sonst ein so genanntes *Over Fitting* entstehen kann. Das bedeutet, dass die Generalisierungsfähigkeit verloren geht und sich das Polynom den Ausreißern und dem Rauschen anpasst. In einer grafischen Darstellung kann dies aber gut erkannt werden. Anschließend werden die Koeffizienten des Polynoms mit der Fehlerquadratmethode [6] aus den messtechnisch ermittelten Stützstellen bestimmt. Die weiteren, kleineren Einflussfaktoren auf den Energiebedarf werden in diesem Moment nicht berücksichtigt und treten als Rauscheinfluss beim Energiebedarf in Erscheinung.

Anschließend kann der erste Einflussfaktor normiert werden, indem alle Stützstellen auf den Normwert  $\bar{x}_k$  bezogen werden; damit wird der erste Einflussfaktor aus den Stützstellen herausgerechnet. Als Normwert  $\bar{x}_k$  wird der Mittelwert aus den zugehörigen Stützstellen verwendet (Gleichung (2)), beziehungsweise der Mittelwert über die Stützstellen der Energiebedarfe  $\bar{E}$  (Gleichung (3)), woraus sich Gleichung (4) und vereinfacht Gleichung (5) ergeben.

Danach folgt mit dem nächstkleineren Einflussfaktor, wie oben beschrieben, der nächste Iterationslauf, wobei  $k$  inkrementiert wird.

Das Verfahren wird mit allen Einflussfaktoren durchgeführt und man kommt zu der allgemeinen

TABELLE	
Zusammenstellung der Gleichungen des Näherungsverfahrens.	
$E_{Z,k} = f(x_k) = c_{k,0} + c_{k,1} \times x_k + c_{k,2} \times (x_k)^2 + \dots + c_{k,n_k} \times (x_k)^{n_k}$	(1)
$\bar{x}_k = \frac{1}{s} \sum_{f=1}^s x_{k,f}$ (2)	$\bar{E} = \frac{1}{s} \sum_{f=1}^s E_f$ (3)
$E_{Z,(k+1)} = E_{Zk} - (c_{k,0} + c_{k,1} \times x_k + c_{k,2} \times (x_k)^2 + \dots + c_{k,n_k} \times (x_k)^{n_k}) + (c_{k,0} + c_{k,1} \times \bar{x}_k + c_{k,2} \times (\bar{x}_k)^2 + \dots + c_{k,n_k} \times (\bar{x}_k)^{n_k})$ (4)	
vereinfacht folgt daraus:	
$E_{Z,(k+1)} = E_{Zk} + c_{k,1} \times (\bar{x}_k - x_k) + c_{k,2} \times (\bar{x}_k^2 - x_k^2) + \dots + c_{k,n_k} \times (\bar{x}_k^{n_k} - x_k^{n_k})$ (5)	
$E_p = f(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{k=1}^m \left( \sum_{l=0}^{n_k} c_{k,l} \times (x_k)^l \right) - (m-1) \times \bar{E}$ (6)	
mit:	
$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{1,0} & c_{1,1} & \dots & c_{1,n_1} \\ c_{2,0} & c_{2,1} & \dots & c_{2,n_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{m,0} & c_{m,1} & \dots & c_{m,n_m} \end{pmatrix}$ (7)	$\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix}$ (8)
auch in Matrixschreibweise darstellbar:	
$E_p = f(\vec{x}) = (1 \ 1 \ \dots \ 1)_{(1,m)} \times \left( \mathbf{C} \circ \begin{pmatrix} x_1^0 & x_1^1 & \dots & x_1^{n_1} \\ x_2^0 & x_2^1 & \dots & x_2^{n_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_m^0 & x_m^1 & \dots & x_m^{n_m} \end{pmatrix} \right) \times \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}_{((m+1),1)} - (m-1) \times \bar{E}$ (9)	
Erläuterungen:	
$E_f$	Stützstellen der messtechnisch ermittelten Energiebedarfe
$\bar{E}$	Mittelwert des Energiebedarfs über alle Stützstellen
$x_{k,f}$	Stützstellen der messtechnisch ermittelten Einflussfaktoren
$\bar{x}_k$	Mittelwert von allen Stützstellen des Einflussfaktors $k$
$E_{Zk}$	Energiebedarf unter Normierung der ersten $(k-1)$ Einflussfaktoren
$E_p$	Näherung/Prognose des Energiebedarfs
$\vec{x}$	Einflussfaktorenvektor (wie Bruttotonnenkilometer, Temperatur, Zugpünktlichkeit)
$\mathbf{C}$	Koeffizienten-Matrix
$c$	Matrix-Element
$m$	Anzahl der Einflussfaktoren
$n_k$	Grad des Polynoms des Einflussfaktors $k$
$s$	Anzahl der Stützstellen
$k$	Laufvariable: Einflussfaktor
$l$	Laufvariable: Potenz
$f$	Laufvariable: Stützstellen

mathematischen Beschreibung des Energiebedarfs mit einer  $m$ -dimensionalen Funktion im Hyperraum, die jeden Einflussfaktor auf die Bahnstromlast mit einem Polynom  $n_k$ -ten Grades annähert: Gleichung (6) und in Matrixschreibweise Gleichung (9). Die Matrizendarstellung eignet sich für die Implementation in Matrizen verarbeitender Software. Die Koeffizientenmatrix  $\mathbf{C}$  wird dabei elementweise mit den elementweise potenzierten Einflussfaktorenvektoren multipliziert. Die elementweise Multiplikation wird durch das Symbol  $\circ$  in Gleichung (9) dargestellt. Die beiden Multiplikationen mit den Vektoren, die mit Einsen gefüllt sind, dienen der Summierung

der Elemente der Matrix zum Skalar  $E$ . Bei manchen Einflussfaktoren besteht die Möglichkeit, diese als Größe direkt in das Verfahren einfließen zu lassen oder als Gradient, das bedeutet als Ableitung nach der Zeit, dies wird in nächsten Abschnitt behandelt.

## 6 Pünktlichkeit versus Pünktlichkeitsgradient

Unabhängig von der mathematischen Abbildung der Einflussfaktoren auf den Energiebedarf stellt sich

die Frage, ob als Maß für den Einfluss der Zugpünktlichkeit auf den Energiebedarf besser die Pünktlichkeit als Zustand verwendet wird oder der Gradient der Pünktlichkeit, sprich die Ableitung der Pünktlichkeit nach der Zeit.

Für die Verwendung des Pünktlichkeitsgradienten spricht, dass zum Einholen einer Verspätung der Zug mehr Energie benötigt. Das bedeutet, dass der Übergang von einem unpünktlichen zu einem pünktlichen Zustand mehr Energie als der Normalbetrieb benötigt, da stärker beschleunigt und gebremst wird. Es ist allerdings auch zu betrachten, wodurch es zu einer Verspätung kommt. Diese entsteht nicht durch eine energiesparende oder langsame Fahrweise. Das Aufbauen von Verspätungen hat auch keinen geringeren Energiebedarf zur Folge. Vielmehr entsteht die Verspätung allgemein durch eine Beschränkung der betrieblichen Bewegungsfreiheit der Fahrzeuge. Beispiele sind Langsamfahrstellen oder spätere Abfahrten, verursacht durch starken Passagierwechsel oder eine Türblockierung. Es ist davon auszugehen, dass bei einer unpünktlichen Betriebslage auch äußere Einflüsse vorliegen.

Daher ist als Einflussfaktor auf den Energiebedarf die Pünktlichkeit als Zustand besser geeignet als der Pünktlichkeitsgradient.

## 7 Schlussfolgerungen

Die Tatsache, dass eine pünktlichere Betriebslage zu einem reduzierten Energiebedarf führt, zeigt: Maßnahmen, welche die Pünktlichkeit steigern, reduzieren indirekt auch den Energiebedarf, es sei denn, sie verursachen selbst einen Energiemehrbedarf, der den Energiespareffekt aufzehrt. Dies wird aber nur bei wenigen Pünktlichkeitsmaßnahmen der Fall sein.

Die Mehrzahl der Pünktlichkeitsmaßnahmen wird das Energiesparen in mehrfacher Hinsicht unterstützen. Ein Beispiel ist das Erhöhen der Fahrzeitreserve im Fahrplan dort, wo es möglich ist: Im Regelbetrieb ermöglicht die größere Fahrzeitreserve dann ein sanfteres und somit energiesparendes Fahren. Im Verspätungsfall verhilft die Fahrzeitreserve dazu, die Verspätung abzubauen und somit auch zum Energiesparen beizutragen. Dieses Beispiel zeigt aber auch, dass die Kausalität beachtet werden muss. Die Folgerung „Pünktlichkeit spart Energie“ ist zulässig, während der Umkehrschluss „Energiesparen schafft Pünktlichkeit“ nicht generell zulässig ist.

Neben dem Energiespareffekt und den damit verbundenen ökologischen und finanziellen Vorteilen für die Eisenbahnverkehrsunternehmen sollte auch der volkswirtschaftliche Nutzen einer pünktlichen Bahn bewertet werden. Ist die Bahn pünktlicher, können die Reisenden knapper terminieren und

IZBE-/VDE-Symposium

## Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen

4. und 5. Dezember 2014  
Dresden, Deutschland  
Internationales Kongresszentrum

Eine Gemeinschaftsveranstaltung des Innovationszentrums Bahntechnik Europa e.V. und des Fachbereichs „Bahnen und Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben“ der ETG im VDE.

Information, Programm und Anmeldung unter:  
[www.izbe.eu](http://www.izbe.eu)

Medienpartner:



brauchen tendenziell weniger Reservezeit vor einem Termin einzuplanen. Insofern ist eine bessere Pünktlichkeit möglicherweise höher zu gewichten als einige Minuten kürzere Fahrzeiten, vor allem mit Blick auf Umsteigeverbindungen. Dadurch lassen sich eventuell Fahrzeitreserven rechtfertigen.

Der positive Effekt der Fahrzeitreserven bestätigt, dass die im schweizerischen integrierten Taktfahrplan teilweise umgesetzte Philosophie richtig ist: „so schnell wie nötig, um den nächsten Taktknoten zu erreichen“ und nicht „so schnell wie möglich“.

Des Weiteren zeigt sich, dass die Bahn als Gesamtsystem betrachtet werden muss. Es ist zum Beispiel anzunehmen, dass eine Fahrweise zum raschen Aufholen einer Verspätung, ein aus Sicht des einzelnen Zuges verschwenderisches Verhalten, sich für den Energiebedarf des Bahnsystems um ein Vielfaches positiver auswirkt. Den Energiebedarf auf Fahrzeugenebene mittels des Fahrverhaltens lokal zu optimieren, führt nämlich nicht zwangsläufig auch zu einer gesteigerten Energieeffizienz des gesamten Bahnsystems, sondern kann, gesamthaft betrachtet, sogar eine Energieverschwendung bewirken.

Hier stellt sich die Frage, ob es für das Bahnsystem überhaupt sinnvoll ist, jedes Triebfahrzeug mit einem Energiezähler auszurüsten, um den Energiebedarf der einzelnen Züge zu optimieren. Werden nämlich durch den Einsatz von Energiezählern Lokomotivführer(innen) und Eisenbahnverkehrsunternehmen zum strikten Energiesparen angehalten, besteht die Gefahr, dass dadurch ein Fehlanreiz geschaffen wird. Dieser bestünde darin, dass Verspätungen nicht mehr so schnell wie technisch möglich aufgeholt würden oder, schlimmer noch, aus vermeintlichen Energiespargründen neu entstünden. Verspätungen, die auf diese Weise bestehen bleiben oder neu entstehen, führen folglich zu einem erhöhten Energiebedarf der anderen Züge. Das ursprüngliche Ziel, mit Energiezählern den Energiebedarf des Bahnsystems zu reduzieren, würde in diesem Fall verfehlt werden, da die Optimierung auf der falschen Ebene angesetzt wird. Da schaffen auch Fahrempfehlungssysteme keine Abhilfe, wenn nicht ein aufwendiges Bonussystem realisiert wird, das den erhöhten Energiebedarf zum Aufholen von Verspätungen kompensiert.

Das Bahnsystem unterscheidet sich hier von Landesnetzen, da die Lasten im Bahnsystem, sprich die Schienenfahrzeuge, sich gegenseitig beeinflussen und voneinander abhängig sind, da sie dieselbe Bahninfrastruktur verwenden. Beschleunigt zum Beispiel ein Fahrzeug langsamer, benötigt es dadurch zwar selbst weniger Energie, gibt aber für das nachfolgende Fahrzeug den Blockabschnitt nicht rechtzeitig frei, wodurch es bei diesem zu einem erhöhten Energiebedarf kommt. Die Schienenfahrzeuge dürfen folglich nicht als isolierte, eigenständige Verbraucher betrachtet werden.

Die vorgestellte Methode zur Näherung der Einflussfaktoren auf den Bahnenergiebedarf lässt sich auch für die Prognose des künftigen Bahnenergiebedarfs verwenden. Dazu werden historische Lastdaten nach der in Abschnitt 5 vorgestellten Methode analysiert. Dadurch „lernt“ die Funktion die Zusammenhänge im System und kann damit bei Eingabe der Einflussfaktoren wieder den Energiebedarf schätzen. Für eine Vorhersage des Bahnenergiebedarfs werden nun Prognosen für die einzelnen Einflussfaktoren, wie zum Beispiel Wettervorhersagen für die Temperatur, verwendet und mit Hilfe der genäherten Funktion kann der erwartete Energiebedarf berechnet werden.

Dasselbe lässt sich auch mit der Leistung des Bahnnetzes realisieren; zusätzlich kann die Zeitbasis variiert werden, zum Beispiel auf Viertelstundennaster.

## Literatur

- [1] Bosch, J.; Aniceto, J.: Potenziale für das Lastmanagement im Bahnenergiesystem. In: Elektrische Bahnen 111 (2013), H. 2, S. 98–103.
- [2] Deutsche Bahn – Externe Kommunikation: Fragen und Antworten zur DB-Pünktlichkeitsstatistik, abgerufen am 19.04.2014 unter: [http://www.bahn.de/p/view/mdb/bahnintern/fahrplan\\_und\\_buchung/reiseauskunft/puenktlichkeitskommunikation/MDB101020-FAQ\\_Puenktlichkeit\\_2012.pdf](http://www.bahn.de/p/view/mdb/bahnintern/fahrplan_und_buchung/reiseauskunft/puenktlichkeitskommunikation/MDB101020-FAQ_Puenktlichkeit_2012.pdf)
- [3] Leeb, R.: SBB-Netz: Mehr Züge – mehr Schienen – mehr Unterhalt. In: Strasse und Verkehr (2014), H. 1-2, S. 23–25.
- [4] Bundesamt für Energie BFE: Überblick über den Energieverbrauch der Schweiz im Jahr 2012, Ittigen 2013.
- [5] Bundesamt für Statistik BFS: Haushaltsszenarien Entwicklung der Privathaushalte zwischen 2005 und 2030, Neuchâtel 2008.
- [6] Bronstein, I. N., et al.: Taschenbuch der Mathematik. Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, Frankfurt am Main, 2008.

### AUTOREN DATEN



**Julius Bosch M.Sc.** B.Eng. (29), Berufsausbildung zum Elektroniker; Bachelorstudium Elektrotechnik HTWG Konstanz und Università degli Studi di Padova (Italien); Masterstudium Elektrotechnik TU München; aktuell bei der SBB Energie beschäftigt und Doktorand an der TU München am Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme.

Adresse: SBB AG Infrastruktur Energie, Industriestr. 1, 3052 Zollikofen, Schweiz;  
Fon: +41 51 220 46 82;  
E-Mail: [julius.bosch@sbb.ch](mailto:julius.bosch@sbb.ch)