



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 26. November 2009

Verifizierung der Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugmanagement

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

SBB AG, BahnUmwelt-Center, CH-3000 Bern

Auftragnehmer:

emkamatik GmbH
Rebbergstrasse 20a
CH-5430 Wettingen
www.emkamatik.com

Autoren:

Markus Meyer, **emkamatik** GmbH, markus.meyer@emkamatik.com
Markus Lerjen, **emkamatik** GmbH, markus.lerjen@emkamatik.com
Stefan Menth, **emkamatik** GmbH, stefan.menth@emkamatik.com
Marco Lüthi, IVT ETH Zürich, marco.luethi@alumni.ethz.ch
Matthias Tuchschnid, mtuchschnid@gmx.net

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Roland Brüniger

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153427 / 102645

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Abstract	4
1 Zielsetzung	5
2 Methodik der Studie	5
3 Ergebnisse.....	6
3.1 Konzept	6
3.2 Energiesparpotential	7
4 Folgerungen.....	7
5 Empfehlungen.....	8
6 Beteiligte Firmen und Institutionen	9
6.1 <i>emkamatik</i> GmbH	9
6.2 IVT der ETH Zürich	9
6.3 <i>mtuchschmid.ch</i>	9
6.4 SBB	9
7 Literatur	10
7.1 Anhänge	10
7.2 Literatur	11

Zusammenfassung

Werden Eisenbahnzüge während ihrer Fahrt durch andere Züge beeinflusst, so resultiert aus den zusätzlichen Abbrems- und Wiederbeschleunigungsvorgängen ein erhöhter Energieverbrauch. Dieser Mehrverbrauch lässt sich reduzieren, wenn durch ein geeignetes System die Anzahl Beeinflussungen vermindert werden kann, oder bei nicht vermeidbaren Beeinflussungen die Disposition den Energieaspekt mitberücksichtigt. Die Studie zeigt, wie die Architektur eines solchen Systems aussehen könnte und schlägt Migrationsschritte zur Einführung vor. Das Einsparpotential wird mittels Simulationen, Messungen im realen Betrieb, Befragungen des betroffenen Personals und entsprechenden Hochrechnungen abgeschätzt und beträgt ca. 5% von 1'800 GWh, also rund 90 GWh. Die SBB beabsichtigt, die vorgeschlagenen Konzepte in den nächsten Jahren umzusetzen.

Abstract

If trains are influenced during their run by other trains, the necessary additional braking and acceleration procedures result in additional energy consumption. This additional consumption might be reduced, if an adequate system can reduce the number of interactions or if on inevitable interactions the dispatching considers the energy aspects. The study shows how the architecture of such a system could look like and proposes migration steps for the introduction. The energy saving potential is estimated by simulations, measurements in real operation, interviews of the concerned personnel and according extrapolations and results in approximately 5% of the total 1'800 GWh, i.e. 90 GWh. SBB plans to implement the proposed concepts in the next years.

1 Zielsetzung

Der Energieverbrauch eines Bahnsystems wird von verschiedensten Faktoren beeinflusst. Neben der Streckentopographie, den Fahrzeugen, der Verkehrsart und dem Fahrplan spielt die Art der Betriebsabwicklung eine wichtige Rolle. Am kleinsten ist der Verbrauch, wenn jeder Zug seine Fahrt unbeeinflusst von anderen Zügen durchführen kann. Je enger in einem Netz die einzelnen Linien miteinander verknüpft sind, und je dichter diese befahren werden, desto höher wird die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Züge gegenseitig behindern. Durch die Sicherungsebene (Stellwerke, Signale) werden Gefährdungen ausgeschlossen. Beeinflussungen zwischen Zügen führen deshalb dazu, dass ein Zug vor einem Signal abbremsen und nachher wieder beschleunigen muss. Dadurch wird zusätzliche Energie verbraucht.

Die in den Jahren 2006 / 2007, ebenfalls im Auftrag des Bundesamts für Energie, durchgeführte Analyse des Traktionsenergieverbrauchs der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) [2.1] zeigte ein beträchtliches Sparpotential auf, wenn die meisten dieser Beeinflussungen vermieden werden, der Verkehr also flüssiger gestaltet werden kann. Das auf Basis der Ergebnisse dieser Studie inzwischen gestartete Energiesparprogramm der SBB [2.3] geht für entsprechende Massnahmen von einem Sparpotential von bis zu 5 % der gesamten Traktionsenergie aus.

Im Rahmen der nun abgeschlossenen zweiten BFE-Studie ging es darum, dieses Potential genauer zu analysieren. Neben der reinen Quantifizierung des Sparpotentials, diesmal den einzelnen Zugskategorien und Netzbereichen zugewiesen, wurden auch detaillierte Überlegungen angestellt, wie dieses Ziel in der heutigen technischen und organisatorischen Ausgestaltung des Bahnsystems erreicht werden kann. Schliesslich wurden durch den Aufbau des Kerns einer neuen Traktions-Energiedatenbank die Voraussetzungen dafür geschaffen, dass der Erfolg der Massnahmen bei der Umsetzung künftig gezielt verfolgt werden kann.

2 Methodik der Studie

Die genauere Ermittlung des Energiesparpotentials durch eine Verflüssigung des Bahnverkehrs verlangt eine Analyse auf zwei Ebenen:

- Einzelne Zugfahrten, ungestört oder mit Beeinflussungen
- Betrieb in einem Bahnnetz bzw. eines Teils daraus, mit gegenseitiger Beeinflussung durch die Züge

Aussagen zum Einfluss auf die Energie können dabei durch unterschiedliche Methoden gewonnen werden:

- Grobe Abschätzung zur Ermittlung der Grössenordnung
- Simulation zur detaillierten Quantifizierung in definierten Situationen
- Auswertung von Messungen
- Auswertung von Befragungen beteiligter Personen wie Lokführer oder Fahrdienstleiter

Alle Varianten wurden im Rahmen der Studie angewendet und deren Ergebnisse miteinander verglichen, so dass sich ein Gesamtbild ergibt, das sich aus der Betrachtung aus verschiedenen Richtungen zusammengesetzt und somit plausibilisierbar ist.

Die Erarbeitung einer Energiekennzahl allein verhilft den zur Realisierung der Einsparungen notwendigen, komplexen Systemen aber noch nicht zum Durchbruch. Ergänzend zu entsprechenden Arbeiten bei den SBB wurden im Rahmen der BFE-Studie deshalb Überlegungen angestellt, wie ein solches System aussehen sollte. Der explizite Einbezug des Energieverbrauchs der Züge in die Optimierung stand bei den Systemüberlegungen an prominenter Stelle. Gleichzeitig zielten diese jedoch auch darauf ab, das System so gut wie möglich in das bestehende Bahnsystem zu integrieren. Nur ein kostengünstiges und ohne grosse Widerstände umsetzbares System wird realisiert werden können und die angestrebten Energieeinsparungen tatsächlich erbringen. Deshalb hatten die Systemuntersuchungen zumindest den gleichen Stellenwert wie die Ermittlung einer Energiekennzahl, die in einen Business-Plan eingesetzt werden kann.

Schliesslich wurde mit dem Projekt der Grundstein gelegt für eine Energiedatenbank, mit deren Hilfe sich der Verbrauch der Züge künftig einfacher nachvollziehen lässt. Der Effekt laufender und künftiger Sparanstrengungen soll damit leichter verifiziert werden können. Die entsprechenden Arbeiten liefen parallel und weitgehend unabhängig von den anderen Arbeiten an der Studie.

3 Ergebnisse

3.1 Konzept

Die Studienergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst. Für die Detailergebnisse wird auf die entsprechenden Fachberichte [1.1 – 1.5] verwiesen, deren Inhalt im Literaturverzeichnis am Schluss des vorliegenden Dokuments aufgeführt ist.

Zum Konzept und zur Architektur eines Systems zur energieeffizienten Bahnbetriebsführung können folgende Aussagen gemacht werden:

- Ein klares und sauber definiertes Konzept für die Ergänzung der bestehenden Anlagen auf Infrastruktur- und Fahrzeugseite ist definiert.
- Methoden zur schnellen Berechnung von Solltrassen für Züge und für die Lösung von Konflikten zwischen den Zügen existieren. Diese ermöglichen die Behandlung einer grossen Anzahl kombinatorischer Möglichkeiten in sehr kurzer Zeit, so dass das Betriebsgeschehen in Schrittweiten von 5 bis 15 Sekunden jeweils neu analysiert und fortlaufend optimiert werden kann. Durch die Rückkopplung des Istzustandes und eine anschliessende neue Initialisierung werden Ungenauigkeiten bei der Berechnung ausreichend ausgeglichen.
- Der Energieverbrauch der Züge kann nach dieser Methode im Sinne eines Beitrags in einer Zielfunktion in die Dispositionsentscheidungen einbezogen werden.
- Eine Positionserfassung der Züge aufgrund der in der Betriebsführung bereits heute vorhandenen Daten (Weg-/Zeitmarken) ist ausreichend.
- Eine Rückmeldung von gegenüber heute zusätzlichen Informationen von den Zügen zur Betriebsleitung erscheint nicht notwendig.
- Alle Ergänzungen sind mit heutigen verfügbaren Geräten realisierbar. Für die Optimierung von grossen Netzknoten werden unter Umständen zusätzliche, leistungsfähige Rechner in den Betriebsleitzentren nötig. An der Software und bei den Schnittstellen bei den Betriebsleitsystemen werden Änderungen und Erweiterungen nötig. Auf Fahrzeugseite ist der Aufbau des Systems grundsätzlich auch mit einfachen Mitteln möglich.

3.2 Energiesparpotential

Im Netz der SBB ist durch den Endausbau eines solchen Systems gegenüber heute folgende Reduktion beim spezifischen Energieverbrauch zu erwarten:

Durch die direkte Verhinderung von unerwarteten Beeinflussungen:

- Im Personen-Fernverkehr etwa 4 bis 5 %. Dieser Wert ist durch die Auswertung von Messungen auf zwei Lokomotiven Re 460 statistisch am besten belegt.
- Im Regional- und S-Bahnverkehr rund 1 bis 3 %, basierend auf den Hochrechnungen der Lokführerbefragungen. Dieser Wert ist kleiner als im Fernverkehr, da viele Beeinflussungen und Dispositionsänderungen mit fahrplanmässigen, also ohnehin stattfindenden Halten zusammenfallen können.
- Im Güterverkehr dürfte das Potential eher höher liegen, da einerseits gemäss den Lokführerbefragungen die Anzahl der vermeidbaren Beeinflussungen relativ hoch ist, und andererseits die Zugmassen im Vergleich zum Personenverkehr einiges höher sind. Eine genaue Quantifizierung aufgrund der Befragungen ist jedoch nicht möglich, da die eingesetzten Zugkompositionen und Lokomotiven sehr unterschiedlich sind.

Im Mittel ergibt sich somit ein Potential, das kleiner ist als die zunächst angenommenen 5 %. Allerdings betreffen die genannten Zahlen nur die Verhinderung der Beeinflussungen selbst. Verfügt der Lokführer jedoch über Informationen über die Betriebslage, so steigt die Bereitschaft zur konsequenten Anwendung der Regeln für energiesparende Fahrweise, beispielsweise durch Senkung der Höchstgeschwindigkeit und weitgehenden Verzicht auf den Einsatz der mechanischen Bremse. Dieser Effekt ist sehr schwer quantifizierbar, dürfte aber in der gleichen Grössenordnung liegen. Diese Aussage basiert auf den nach wie vor deutlichen Unterschieden in der Fahrweise der einzelnen Lokführer und auf dem Fehlen fast jeglicher Information über die Betriebslage heute.

Als bestmögliche Schätzung ergibt sich somit das Sparpotential, aufgeschlüsselt nach Einflussfaktoren:

- Weitgehende Reduktion der unerwarteten Beeinflussungen durch Signale: 2 bis 3 %
- Noch konsequentere Anwendung der energiesparenden Fahrweise durch die Lokführer dank Information über die Betriebslage im Führerstand: 1 bis 2 %
- Langfristig zusätzlich durch Einbezug des Energieverbrauchs in der Zielfunktion für eine optimierte, automatische Trassenwahl: 0.5 bis 1 %

4 Folgerungen

Zusammenfassend können daraus folgende Schlüsse gezogen werden:

- Eine Minimierung des Energieverbrauchs sowie eine flüssige, und damit pünktliche Abwicklung des Bahnbetriebs und hohe Ausnutzung der Streckenkapazität stehen nicht miteinander im Widerspruch, sondern unterstützen sich gegenseitig.
- Die durch eine Verflüssigung des Bahnverkehrs auf dem SBB-Netz erwarteten Energieeinsparungen sind mit der heutigen Technik durch ein entsprechend aufgebautes System erreichbar.
- Neben dem rein technischen Aufbau eines solchen Systems soll der guten Integration der Lokführer besondere Beachtung geschenkt werden. Nur dann werden die vollen Möglichkeiten tatsächlich ausgeschöpft und die erwarteten Einsparungen realisiert.

- Die grössten Einsparungen ergeben sich im Personen-Fernverkehr und in grossen Netzknoten und dicht befahrenen Bereichen des Netzes, insbesondere dort wo mit hohen Geschwindigkeiten gefahren wird.

5 Empfehlungen

Für die kommenden Schritte bei der Definition, dem Aufbau und der Einführung eines Systems zur flüssigen Bahnbetriebsführung erlauben wir uns, aus den Erkenntnissen des BFE-Projekts heraus die folgenden Empfehlungen zu geben:

- Der Aspekt des Energieverbrauchs soll konsequent berücksichtigt werden. Dies betrifft einerseits die Anzeige auf den Fahrzeuggeräten, die z.B. anzeigen soll, wann und wie stark der Lokführer in Eigenverantwortung energiesparend fahren darf. Mittelfristig soll die Minimierung des Energieverbrauchs durch die geeignete Berücksichtigung in einer Zielfunktion auch bei Dispositionsentscheiden mitberücksichtigt werden können.
- Die Schulung des Lokpersonals im Hinblick auf pünktliche und energiesparende Fahrweise sollen konsequent weitergeführt werden. Diese Kenntnisse sind auch nach dem Aufbau eines Systems zur energieeffizienten Betriebsführung wichtig.
- Das System soll so gestaltet werden, dass der Empfang und die Darstellung der Informationen fahrzeugseitig mit verschiedenen Geräten möglich ist. Nur so gelingt eine schnelle Verbreitung bei verschiedenen Bahnverkehrs-Unternehmen.
- Das System soll schrittweise zunächst im Sinne eines „Rapid Prototyping“ in sämtlichen funktionalen Einheiten, aber noch nicht mit definitiven Geräten und definitiver Software aufgebaut und ausgetestet werden. Nur dadurch lassen sich in einer frühen Phase ausreichend viele Situationen erfassen, die unter Umständen noch einen Einfluss auf die Detail-Systemarchitektur haben können. Insbesondere für die Schnittstelle zwischen den im Fahrzeug dargestellten Informationen (die auf Infrastruktur-seite aufbereitet werden müssen) und der idealen Fahrweise der Lokführer empfiehlt sich dieses Vorgehen.

6 Beteiligte Firmen und Institutionen

6.1 *emkamatik* GmbH

Unabhängige Ingenieurfirma für Eisenbahn-Systemfragen. *emkamatik* unterstützt die SBB fachlich bei der Umsetzung des Energiesparprogramms. Im Rahmen der BFE-Studie führte *emkamatik* die Arbeiten zum Konzept und zur Systemarchitektur aus, machte die Simulationsrechnungen und wertete die Messungen aus. Die Koordination aller fachlichen Arbeiten unter den Projektpartnern im Rahmen der Studie lag ebenfalls bei *emkamatik*.

Adresse: Rebbergstrasse 20a, 5430 Wettingen.

Kontaktpersonen:

- **Markus Meyer.** Tel 079 460 61 49, markus.meyer@emkamatik.com
- **Markus Lerjen.** Tel 079 540 26 12, markus.lerjen@emkamatik.com
- **Stefan Menth.** Tel 079 635 26 85, stefan.menth@emkamatik.com

6.2 IVT der ETH Zürich

Das Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich war bereits vor der BFE-Studie zusammen mit den SBB an Projekten zur flüssigeren Betriebsführung beteiligt und konnte entsprechendes Wissen ins BFE-Projekt mit einbringen. Im Rahmen der Studie wurden vom IVT vor allem die Befragungen der Lokführer und die entsprechenden Auswertungen durchgeführt.

Adresse: Wolfgang-Pauli-Strasse 15, 8093 Zürich.

Kontaktpersonen:

- **Prof. Dr. Ulrich Weidmann.** Tel 044 633 33 50, weidmann@ivt.baug.ethz.ch
- **Marco Lüthi**, der die Arbeiten an der Studie durchgeführt hat, arbeitet nach dem Abschluss seiner Dissertation nicht mehr an der ETH Zürich. marco.luethi@alumni.ethz.ch

6.3 *mtuchschmid.ch*

Unabhängiger Informatiker. Im Rahmen des Projekts Erstellung der Struktur für die Energiedatenbank.

Adresse: Fellenbergweg 14, 8047 Zürich

- **Matthias Tuchs Schmid**, Tel 078 788 04 00. info@mtuchschmid.ch

6.4 SBB

Die SBB waren im Projekt primär durch das BahnUmwelt-Center (BUC) vertreten. Das BUC koordiniert das Energiesparprogramm der SBB. Weitere regelmässige Kontakte während des Projekts bestanden mit Personen der Infrastruktur / Betriebsführung sowie Prüfungsexperten für das Lokpersonal aus den Divisionen Personenverkehr und Güterverkehr. Durch die Kontakte mit den verschiedenen Fachstellen wurde sichergestellt, dass die Arbeiten den aktuellen Stand laufender Projekte bei den SBB berücksichtigen, und umgekehrt dass die

Arbeiten von *emkamatik* und unseren Partnern frühzeitig von Leuten aus der Bahnpraxis kommentiert werden konnten und entsprechende Anregungen einfließen. Die Messungen auf den Re 460 wurden ebenfalls von den SBB abgewickelt.

Adresse: Generaldirektion SBB, GS-BUC, Hochschulstrasse 6, 3000 Bern 65.

Kontaktperson:

- **Markus Halder**, Tel 0512 20 42 94. markus.halder@sbb.ch

7 Literatur

7.1 Anhänge

- [1.1] M. Meyer, M. Lerjen: **Konzept und Systemarchitektur**. *emkamatik*-Dokument 09-0314, Version 1 vom 26.11.2009

Beschreibung des vorgeschlagenen Systemaufbaus, der einen energieoptimierten flüssigen Bahnbetrieb am besten ermöglicht. Gedanken zur schrittweisen Umsetzung und zur Integration ins bestehende Bahnsystem im Hinblick auf die heutige organisatorische Struktur (Interoperabilität zwischen verschiedenen Bahnverkehrs-Unternehmen).

- [1.2] M. Lerjen, M. Meyer: **Simulationen**. *emkamatik*-Dokument 09-0315, Version 1 vom 26.11.2009

Simulationen für einzelne Zugfahrten in verschiedenen Betriebssituationen, Ausweisen des Einflusses auf den Energieverbrauch. Netzwerksimulationen anhand eines vereinfachten Netzknotens zur Verifikation des vorgeschlagenen Konzepts.

- [1.3] S. Menth, M. Meyer: **Messungen und Hochrechnungen**. *emkamatik*-Dokument 09-0316, Version 1 vom 26.11.2009

Auswertung von mehrwöchigen Messungen auf zwei Lokomotiven Re 460 zur Ermittlung der Häufigkeit von Beeinflussungen durch unplanmässige Signalstellungen im Hinblick auf den dadurch entstehenden Energiemehrbedarf. Analoge Auswertung der Ergebnisse der Lokführerbefragungen.

- [1.4] M. Lüthi: **Beeinflussungen von Zugfahrten**. Dokument IVT R-08-07, Version 1 vom 26.11.2009

Beschreibung der verschiedenen im Bahnbetrieb vorkommenden Beeinflussungen von Zugfahrten. Ergebnisse der Befragung von Lokführern in verschiedenen Regionen über die Art und Häufigkeit solcher Beeinflussungen.

- [1.5] M. Tuchschnid: **Energiedatenbank Traktion**. Bericht vom 26.11.2009

Beschreibung der Struktur der Datenbank für den Energieverbrauch von einzelnen Zügen, die künftig bei den SBB für die Analyse des Ist-Verbrauchs und des Effekts von Sparmassnahmen verwendet werden soll.

7.2 Literatur

- [2.1] M. Meyer, S. Menth, M. Lerjen: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB. Schlussbericht des Projekts 101826 im Auftrag des Bundesamts für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität, Dezember 2007
- [2.2] M. Meyer, M. Roth, B. Schaller: Einfluss der Fahrweise und Betriebssituation auf den Energieverbrauch von Reisezügen. Schweizer Eisenbahn-Revue, Eisenbahn-Revue International und Eisenbahn Österreich 8-9/2000
- [2.3] M. Meyer, M. Lerjen, S. Menth, M. Halder: Das Energiesparprogramm der SBB. Schweizer Eisenbahn-Revue, Eisenbahn-Revue International und Eisenbahn Österreich 7/2008
- [2.4] M. Lüthi, A. Nash, U. Weidmann, F. Laube, R. Wüest: Increasing railway capacity and reliability through integrated real-time rescheduling. Proceedings of the 11th World Conference on Transport Research, Berkeley, 2007
- [2.5] M. Lüthi: Improving the Efficiency of Heavily Used Railway Networks through Integrated Real-Time Rescheduling, Dissertation, IVT, ETH Zürich, 2009.
- [2.6] S. Roos: Bewertung von Knotenmanagement-Methoden für Eisenbahnen. Diplomarbeit am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich, Januar 2006