



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht, Anhang 1 26. November 2009

Verifizierung der Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugmanagement

Konzept und Systemarchitektur

Energieeffiziente Eisenbahn-Betriebsführung:

Konzept und Systemarchitektur

Informationen zu diesem Dokument

Das vorliegende Dokument ist Teil des Schlussberichts zu der von *emkamatik* GmbH und weiteren Beteiligten erstellten BFE-Studie „Verifizierung der Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugmanagement“ [1]. Es enthält die Betrachtungen zum Gesamtkonzept und zur Systemarchitektur, die einen energieoptimierten Bahnbetrieb künftig ermöglichen sollen, sowie die daraus abgeleiteten Empfehlungen für die weitere Entwicklung und Einführung der entsprechenden Systeme.

1 Einführung

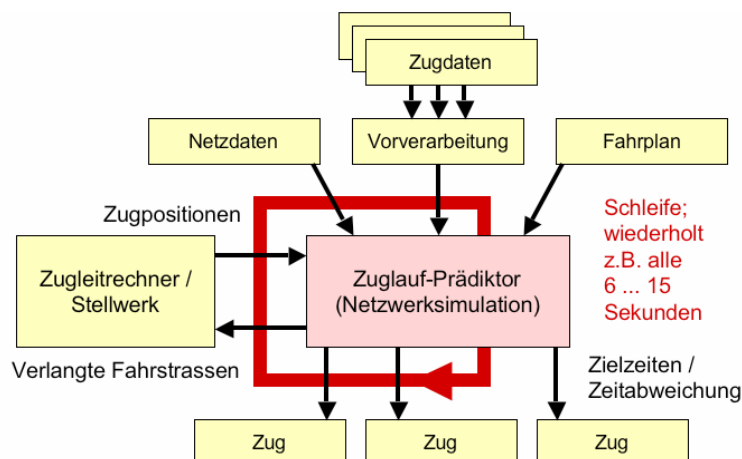
Bereits die im Jahr 2006 / 2007 durchgeführte Potentialermittlung ergab, dass sich die grössten Energieeinsparungen im Bahnbetrieb durch einen möglichst flüssigen Betrieb erzielen lassen [3]. Hauptaufgabe der nun vorliegenden BFE-Studie war es, diese Energieeinsparungen genauer auszuweisen bzw. den einzelnen Zugkategorien oder Infrastrukturbereichen zuzuweisen. Ausserdem sollen die Randbedingungen für die Systementwicklung aufgezeigt werden, unter denen solche Leitsysteme in Bezug auf Energieeffizienz realisiert werden können.

Die Ideen zum Konzept für eine energieeffiziente Eisenbahn-Betriebsführung stützen sich einerseits auf Vorarbeiten der SBB und der ETH Zürich, wie „Puls 90“ und „PIK-FARE“ [5, 6]. Diese bildeten eine wertvolle Grundlage. Der Einbezug der Energie war jedoch nicht explizit vorgesehen. Parallel zu den übrigen Arbeiten wurden deshalb die vorgesehenen Konzepte hinterfragt und abgeändert oder ergänzt. Im vorliegenden Teilbericht ist die nun vorgeschlagene Systemarchitektur beschrieben, ergänzt durch Empfehlungen für ein geeignetes Vorgehen bei der Realisierung des Projekts. Die Vorschläge haben inzwischen auch Eingang gefunden in die weiteren Planungen der SBB.

2 Systemarchitektur

2.1 Gesamtsystem

Die folgende Figur zeigt ein einfaches Blockdiagramm des aufzubauenden Gesamtsystems. Die einzelnen Funktionsblöcke sind in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.



2.2 Zuglauf-Prädiktor

2.2.1 Allgemeines

Kern des Systems ist ein Prädiktor für den Lauf aller Züge. Er bildet das aktuelle Betriebsgeschehen ab und macht Voraussagen für die Zukunft. Aus der entsprechenden Prognose können sowohl die Vorgaben für die weitere Betriebsführung (z.B. die gezielte Wahl der Fahrstrassen für die einzelnen Züge) als auch die an die Züge zu übertragenden Informationen abgeleitet werden.

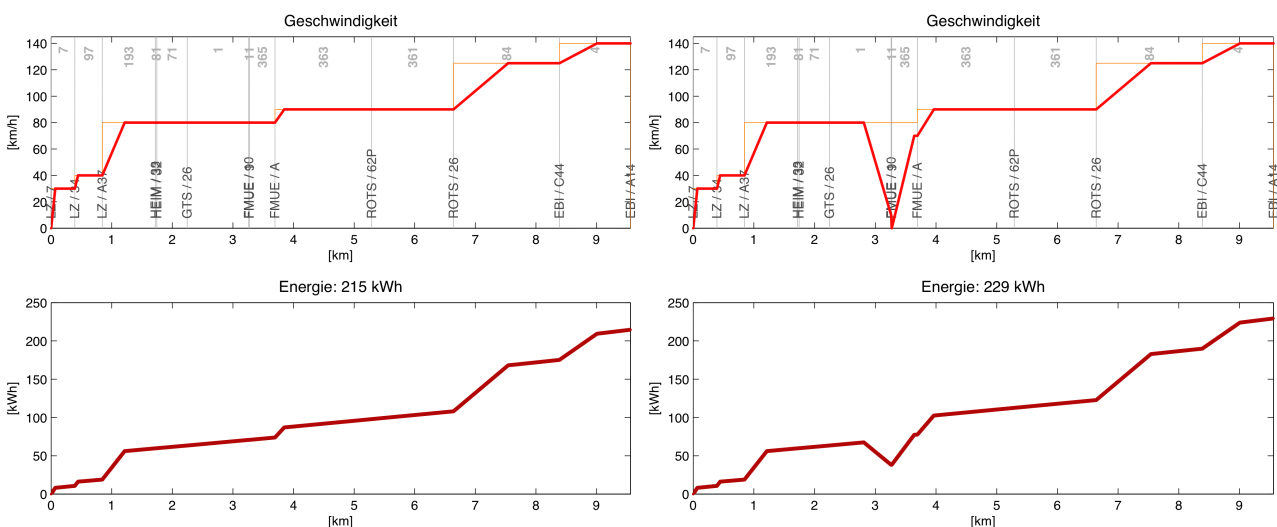
Der Zuglauf-Prädiktor ist eine funktionale Einheit. Damit ist bewusst nichts ausgesagt über das Gerät oder die Software, worin er realisiert werden soll. Eine solche Wahl wird sinnvollerweise auch erst getroffen, wenn die Richtigkeit und Wirksamkeit der Systemarchitektur und ihrer einzelnen Blöcke ausreichend im Betrieb belegt ist (siehe dazu die Bemerkungen am Schluss dieses Berichts).

2.2.2 Simulation von Einzelzugfahrten

Zur Realisierung des Prädiktors für einen Netzknoten oder ein ganzes Teilnetz wird eine sehr schnelle, aber ausreichend genaue Zuglaufrechnung benötigt. Sie muss nicht nur die Eigenschaften der Strecke (Längen- und Geschwindigkeitsprofil, evtl. auch das Höhenprofil), sondern auch diejenigen der Züge genau abbilden. Dies betrifft natürlich die Maximalgeschwindigkeit, das Beschleunigungs- und Bremsverhalten, aber auch die Zuglänge.

Für die Studie verwendet wurde ein in unserem Tool **emkaTrain** vorhandener Algorithmus. Er erfüllt nicht nur diese Anforderungen, sondern ermöglicht gleichzeitig die Berechnung der vom Zug aufgenommenen oder zurückgespeisten Energie in sehr guter Näherung, ohne nennenswerte Vergrößerung der Rechenzeit. Dies dient als Input für die später vorgestellte Zielfunktion für die Netzwerkoptimierung.

Die beiden folgenden Figuren zeigen je ein Beispiel für einen damit simulierten Zuglauf ohne und mit Beeinflussung durch ein Halt zeigendes Signal für einen Fahrweg aus dem „reduzierten Modellnetz“ Luzern.



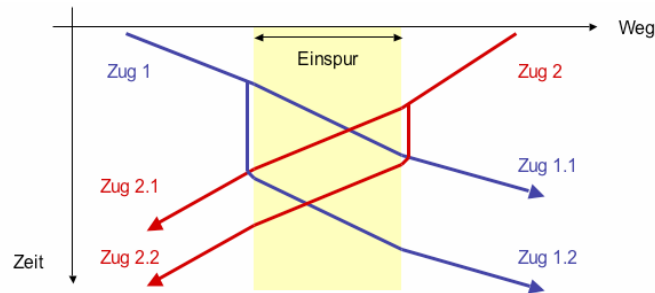
2.2.3 Netzwerksimulation

Sind allen Zügen eindeutig im voraus definierte Laufwege zugewiesen, so kann die Vorhersage für den Lauf der Züge aus einzelnen Zuglaufrechnungen zusammengesetzt werden. In realen Netzen sind die Verhältnisse komplexer:

- Für einen Zug stehen möglicherweise mehrere Laufwege zur Verfügung, z.B. im Fall von Doppelspurstrecken oder bei Ausweichstellen.
- Züge mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, Beschleunigungsvermögen oder Anzahl Halten können sich gegenseitig einholen.
- Der Laufweg zweier Züge ist nicht immer konfliktfrei, d.h. beide Züge möchten gleichzeitig die gleichen Gleisabschnitte befahren (z.B. bei Kreuzungen oder Paralleleinfahrten). Einer der beiden Züge muss dann warten, bis der andere den Abschnitt wieder freigegeben hat.

Der Übersichtsbeitrag [4] postuliert, dass für eine derartige Optimierung in realen Bahnnetzen mit anspruchsvollen Bedingungen (inkl. Mischbetrieb Reise- und Güterverkehr) bisher keine Lösung existiert. Die Autoren des vorliegenden Teilberichts sind aber der Meinung, dass der im Rahmen der BFE-Studie erarbeitete und hier vorgestellte Ansatz grundsätzlich in der Lage ist, eine für reale Bahnnetze ausreichende Optimierung sicherzustellen.



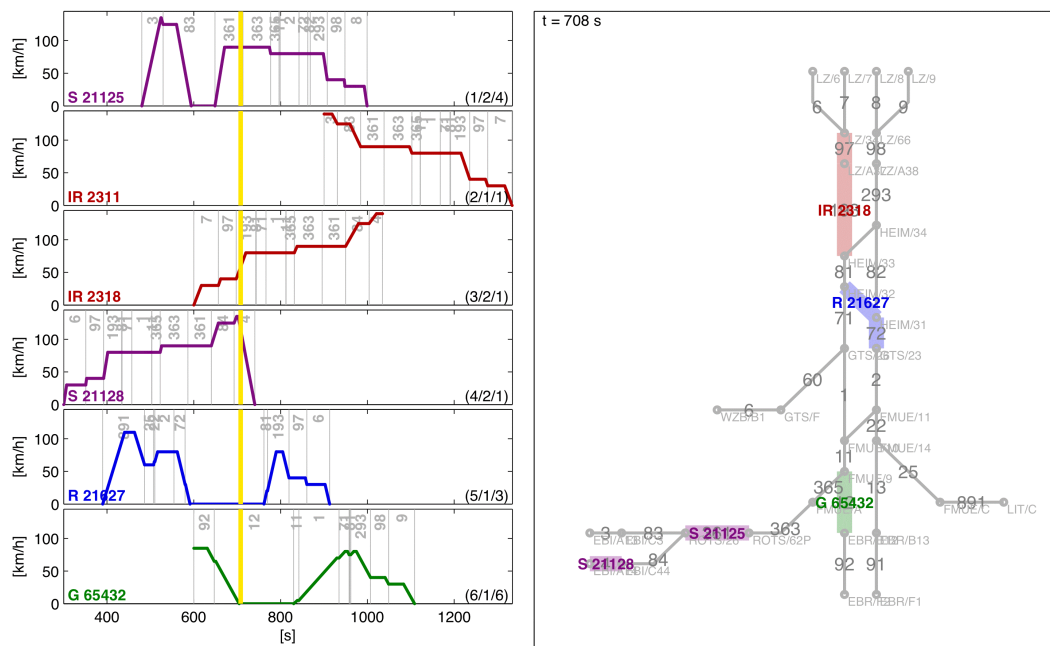


Die Voraussetzung dafür ist, dass die Berechnung einer einzelnen Zugfahrt, unter Berücksichtigung der örtlichen und zeitlichen Einschränkungen (erlaubte Durchfahrtszeiten bei den Signalen), äusserst schnell geht. Der im Rahmen der Studie verwendete Algorithmus aus **emkaTrain** erfüllt diese Voraussetzungen. Die Berechnung einer einzelnen Zugfahrt benötigt auf einem handelsüblichen PC nur wenige Millisekunden.

Zur Lösung der Optimierungsaufgabe müssen unter Umständen mehrere Tausend einzelne Zugfahrten berechnet werden, nämlich die Kombination aller denkbaren Varianten. Zusätzlich zur Berechnung der Zugfahrten fällt auch noch die Rechenzeit zur Ermittlung der Gleisbelegung und der daraus abgeleiteten erlaubten Durchfahrtszeiten für den Gegenzug an.

Die im Rahmen der Studie durchgeführten Simulationen für das „reduzierte Modellnetz Luzern“ lösen die Optimierungsaufgabe für sechs Züge in rund einer halben Sekunde, auf einem schnellen handelsüblichen PC. Die Software dazu läuft unter Matlab (siehe [2]). Eine Implementation auf einem leistungsfähigen (Gross-) Rechner, mit Parallelisierung von Rechenprozessen und einer effizienten Codierung ohne die Zwischenstufe Matlab dürfte diese Rechenzeit um Grössenordnungen reduzieren. Es darf deshalb davon ausgegangen werden, dass sich die Optimierungsaufgabe für echte Bahnknoten in den geforderten fünf bis sechs Sekunden lösen lässt.

Die folgende Figur zeigt eine Lösung für das Modellnetz. Einzelne Züge werden als Teil der Lösung angehalten, um anderen die freie Fahrt zu ermöglichen (Aussagen betr. Nachverarbeitung siehe unten). Es bleibt zu ergänzen, dass der im Rahmen der Studie programmierte Algorithmus die Belegung der Gleisabschnitte und die Auflösung der Fahrstrassen nach Passieren der konkreten Zuglänge korrekt wiedergibt. Die „Vorschau“ (Einstellen der Fahrstrasse) und damit die vollständige „Sperrtreppe“ wurden aus Aufwandsgründen noch nicht programmiert. Dies ist jedoch kein prinzipielles Problem und lässt sich ohne Nachteile für die Systemarchitektur oder die verwendeten Algorithmen ergänzen.



2.2.4 Zielfunktion für Zeit und Energie

Von besonderer Bedeutung für einen energieoptimalen Bahnbetrieb ist nun, dass es mit dem vorgeschlagenen Konzept gelingt, für alle denkbaren Varianten nicht nur die Fahrzeiten und die Gleisbelegung zu berechnen, sondern gleichzeitig auch die von allen Zügen zusammen aufgenommene Energie. Die Rechenzeit wird dabei nur unwesentlich erhöht.

Damit wird es möglich, eine Zielfunktion zu definieren, um die optimale Lösung auszuwählen:

$$\sum k_i \Delta t_i + k_E \sum E = \text{minimal}$$

Die Zielfunktion ist die Summe aus allen gewichteten Verspätungen der Züge plus die gesamte aufgenommene Nettoenergie über den betrachteten Zeitraum. Durch die Wahl der Gewichtungsfaktoren k_i lassen sich Züge priorisieren (z.B. im Fall von zu erreichenden Anschlüssen) oder komplett aus der Betrachtung ausblenden (z.B. im Fall von Güterzügen ohne zwingende Ankunftszeit). Auch die Energie lässt sich über den Faktor k_E gegenüber der gesamten Verspätung unterschiedlich stark gewichten. Damit entsteht auch die Möglichkeit, den Energieverbrauch z.B. je nach Situation stärker oder schwächer zu gewichten, z.B. schwach bei verspätetem Betrieb, oder stark solange alle Züge pünktlich sind.

Allerdings zeigt sich, dass das Zeit- und das Energieoptimum meistens sehr nahe beieinander liegen, ein pünktlicher und energiesparender Bahnbetrieb also auch aus Sicht der Betriebsführung kein Widerspruch ist (s. auch [2]).

2.2.5 Nachverarbeitung und Datenausgabe

Die vom „Prädiktor“ erzeugte optimale Lösung muss im Hinblick auf zwei Aspekte für die einzelnen Züge noch nachverarbeitet werden:

- Auslesen der Zeit-Weg-Information und Umwandlung in den geeigneten Datensatz für die Übermittlung an den betreffenden Zug
- Evtl. Feinoptimierung innerhalb der „abgesteckten“ Zeit-Weg-Schranken, nach dem Auslesen und vor der Übermittlung. Dies bedeutet: Die Netzwerksimulation mit allen Zügen muss grundsätzlich so ablaufen, dass für das Gesamtnetz ein gültiges Optimum gefunden wird. Bei dichtem Betrieb mit vielen möglichen Konflikten wird die Lösung aber so ausfallen, dass sie einem schnellstmöglichen Betrieb mit höchster Strecken- und Knotenkapazität entspricht. Wenn diese Lösung für alle Züge fixiert ist, darf jeder Zug für sich allein noch weiter energieoptimal betrieben werden, ohne dass er andere Züge wieder behindert.

2.2.6 Zeitkonstanten und Rückkopplungseffekte

Die Zykluszeit von 6 bis 15 Sekunden, die für die Abarbeitung der innersten Optimierungsschleife gefordert ist, wurde intuitiv bestimmt. Sie entspricht der maximalen Präzision, mit der ein Zug überhaupt geführt werden kann. Sie entspricht ebenfalls etwa der Zeit, die ein Zug für die Vorbeifahrt an einem Punkt benötigt (z.B. 75 m Zuglänge bei 40 km/h oder 300 m bei 160 km/h). Eine feinere zeitliche Auflösung ist deshalb unnötig.

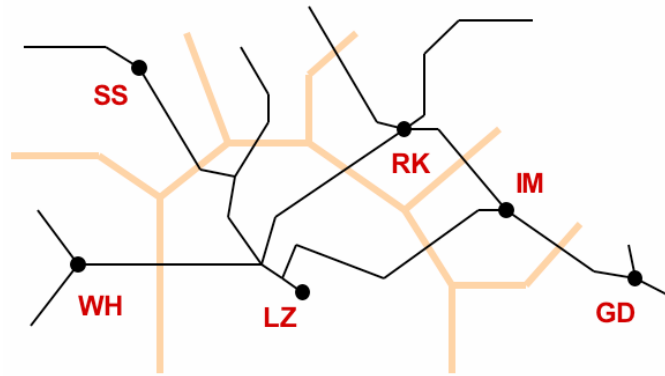
Wichtiger ist, der tatsächliche Betriebszustand in jedem Zyklus wieder korrekt nachgeführt wird. Dadurch mitteln sich Unsicherheiten aus. Je näher ein Zug an einem Konfliktpunkt ist, desto genauer wird die Prädiktion.

2.3 Netzeinteilung in Zonen

2.3.1 Kriterien für eine Zone

Der vorgeschlagene „Prädiktor“ für den Bahnbetrieb lässt sich natürlich nicht für die ganze Schweiz gemeinsam programmieren. Deshalb muss das Netz in Zonen eingeteilt werden. In jeder Zone läuft ein Prädiktor, der den Lauf der Züge verfolgt, optimiert und die Vorgaben für die Züge erzeugt.

Die Figur zeigt eine mögliche Einteilung im erweiterten Raum Luzern (LZ), mit den nächsten Zonen Wolhusen (WH), Sursee (SS), Rotkreuz (RK), Immensee (IM) und Arth-Goldau (GD). Diese Einteilung ist willkürlich, erscheint aufgrund der nachher genannten Schnittstellenbedingungen aber sinnvoll.



2.3.2 Schnittstellen zwischen den Zonen

Die Zonen können wie folgt voneinander abgegrenzt werden:

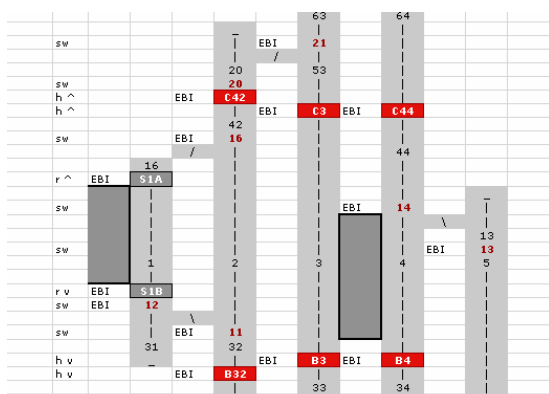
- Es müssen klare „Übergabebedingungen“ für die Züge bestehen
- Dazu soll das Betriebsgleis an der Zonengrenze eindeutig festgelegt sein, entweder aufgrund der Topologie (z.B. Einspurstrecke), oder einer normalen oder aussergewöhnlichen Disposition (auf Doppelspurstrecken)
- Der Zug muss in jeder Zone korrekt „initialisiert“ werden können. Zunächst wird er aufgrund der Prädiktion der Nachbarzone angemeldet. Sobald er die Zonengrenze erreicht, wird die Prädiktion (z.B. Fahrgeschwindigkeit) mit der aktuellen Position ergänzt, solange bis der Zug ganz in der neuen Zone ist.
- Dadurch entsteht ein Überlappungsbereich von etwa zwei bis drei Blockabschnitten an der Zonengrenze, der in beiden Zonen behandelt wird.

2.4 Dateneingabe

2.4.1 Netzdaten

Von der Bahninfrastruktur werden folgende Daten benötigt:

- Netztopologie (Knoten, Kanten)
- Signalstandorte, zulässige Zugfahrstrassen
- Zulässige Geschwindigkeiten je nach Zugreihe
- Höhenprofil (jedoch vereinfacht, und nur falls nennenswerte Steigungen und / oder schwere Güterzüge berücksichtigt werden müssen)

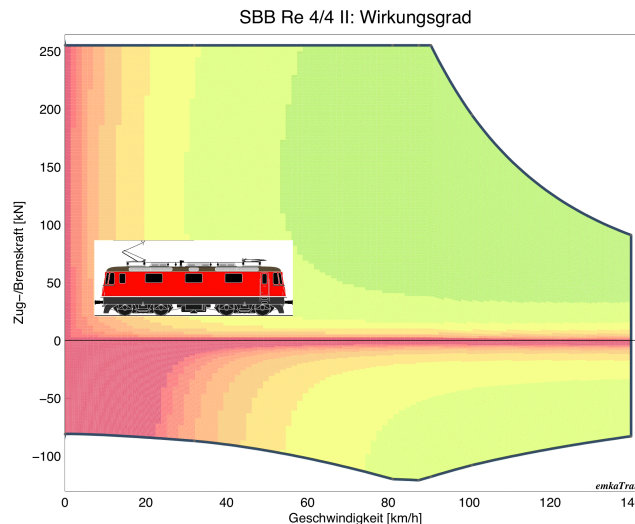


2.4.2 Fahrzeugdaten

Die Züge werden durch die für Zuglaufrechnungen üblichen, notwendigen Daten charakterisiert:

- Zugmasse und Länge
- Elektrische Zug- und Bremskraft der Triebfahrzeuge
- Verfügbare maximale mechanische Bremskraft des ganzen Zuges

Zusätzlich werden für die Energierechnung die Wirkungsgrad-Kennfelder der Triebfahrzeuge benötigt. Obwohl eine schnelle Zuglaufrechnung immer mit gewissen Vereinfachungen verbunden ist, können durch geeignete Anbindung des Kennfelds trotzdem die spezifischen Eigenschaften jedes Fahrzeugs berücksichtigt werden. Die Figur zeigt das Kennfeld der Re 4/4 II, die beispielsweise einen etwas geringeren Wirkungsgrad der elektrischen Bremse (und auch eine geringere maximale Bremskraft) aufweist als moderne Umrichter-lokomotiven.



2.4.3 Fahrplan

Selbstverständlich ist für die Netzwerksimulation der Sollfahrplan für die Züge erforderlich. Sofern die Zone mit automatischer Trassenwahl simuliert wird, betrifft dies jedoch nur noch die in den Fahrplänen veröffentlichten Abfahrtszeiten der Reisezüge. Alle anderen Zeiten, wie Durchfahrts- und Ankunftszeiten, ergeben sich als selbständig optimierte Prozesswerte.

2.5 Schnittstelle zur Betriebsleittechnik

2.5.1 Zugpositionen

Das vorgeschlagene Konzept beruht auf den Vorarbeiten der SBB, was die Ortung der Züge betrifft. Bei jeder Vorbeifahrt an einem Hauptsignal kann der Zug infrastrukturseitig erfasst werden. Aufgrund der Ergebnisse unserer Studien kommen wir zum Schluss, dass dies ausreichend ist, nicht nur um die Position der Züge zu bestimmen, sondern auch um hinreichend genau deren Geschwindigkeit nachvollziehen zu können (s. Validierungsbeispiele unten). Weitergehende technische Massnahmen (wie Positionierung über GPS, Einlesen oder sogar Übermittlung eines Geschwindigkeitssignals aus den Zügen) halten wir für nicht notwendig. Damit wird das Konzept in der Praxis überhaupt erst realisierbar (siehe Bemerkungen zur Interoperabilität).

2.5.2 Anforderung von Fahrstrassen

Läuft der „Prädiktor“ vollständig, also einschliesslich der automatischen Wahl der Abfolge der Züge und ihres Laufwegs, so muss vom Prädiktor aus die gewünschte Fahrstrasse angefordert werden können. Dazu ist einerseits eine geeignete Schnittstelle zu schaffen. Andererseits muss die Anforderung zeitlich so geschehen, dass die Fahrstrassen nur gerade soweit im voraus eingestellt werden, dass der Lokführer an den Signalen keine unnötigen Beeinflussungen erfährt. Letzteres ist bei der automatischen Zuglenkung bereits seit längerem Praxis. Umgekehrt stellt eine einmal angeforderte Fahrstrasse für den Prädiktor einen eingefrorenen Zustand dar. Für den betreffenden Zug reduziert sich die mögliche Wahl des Laufwegs

dadurch ständig, was gleichzeitig die Anzahl der zu berechnenden kombinatorischen Möglichkeiten reduziert.

2.6 Fahrzeuggeräte

2.6.1 Aufgabe

Die Fahrzeuggeräte haben als primäre Aufgabe die Anzeige der Information aus der Betriebsführung. Dem Lokführer müssen diese in geeigneter Weise und situationsgerecht dargestellt werden. Unserer Ansicht nach hat ein solches System nur Erfolg, wenn es mit einem Minimum an Ausgaben auskommt, der Lokführer also nicht dauernd auf eine Zeitabweichung oder empfohlene Geschwindigkeit achten muss. Sonst besteht die Gefahr, dass Informationen auch dann nicht mehr beachtet werden, wenn sie wichtig sind.

Umgekehrt können Fahrzeuggeräte grundsätzlich auch dafür gedacht sein, Informationen vom Zug zurück an die Betriebsführung zu übertragen. Aus unserer Sicht muss dies aber verhindert bzw. schon vom Konzept her unnötig sein, da sich dies im heutigen Bahnumfeld als enormer Hinderungsfaktor bei der Realisierung erweisen würde.

2.6.2 Mögliche Anzeige

Es war nicht Aufgabe der Studie, ein Layout für die Anzeige beim Lokführer zu entwerfen. Im Rahmen des Entwurfs der Gesamtsystemarchitektur haben wir uns jedoch Gedanken gemacht, was angezeigt werden sollte, um die beiden folgenden Ziele erreichen zu können:

- Zeitpräziser Betrieb zur maximalen Ausnutzung der Strecken- und Knotenkapazität
- Energiesparende Fahrweise unter Einbezug der Informationen aus der Betriebsführung

Die folgenden Beispiele sollen deshalb als eine Zusammenfassung der funktionalen Anforderungen aufgefasst werden. Diese bestehen aus vier Einheiten:

- Vorschau (hier dargestellt im Rahmen oben): was hat der Lokführer vor sich. Dies hilft, die Signalstellungen und die übrige Information auf dem Display richtig zu interpretieren.
- Rückschau (im Rahmen unten): was folgt dem Zug nach. Diese Information hilft, ohne komplexe andere Anzeigen zu signalisieren, bis wie weit möglichst flüssig gefahren werden muss, z.B. beim Fahren „im Bündel“ oder beim Nachrücken in Knotenbereichen.
- Zeitabweichung oder empfohlene Geschwindigkeit (Mitte, rechte Spalte): wie liegt der Zug gegenüber seiner von der Betriebsführung festgelegten Idealtrasse. Diese Information soll nur dargestellt werden, wenn ein „Einfädeln“ auf die Idealtrasse nötig ist, um Beeinflussungen des eigenen oder anderer Züge zu verhindern.
- Empfehlung zur energiesparenden Fahrweise (Mitte, linke Spalte): da die Betriebsführung sowohl die Betriebssituation als auch die Daten des betreffenden Zuges kennt, kann dem Lokführer auf einfache Art angezeigt werden, ob energiesparendes Fahren zulässig ist oder nicht.

Die folgenden Beispiele sollen dieses Konzept veranschaulichen.



Grundstellung

Der Zug befindet sich ausserhalb eines Knotenbereichs und ist pünktlich.

Der Lokführer wendet die „ökonomische Referenzfahrweise“ (pneumatische Bremsen nur bei tiefer Geschwindigkeit) an, solange sein Zug pünktlich bleibt und keine neue Meldung angezeigt wird.



Schnellstmögliche Fahrweise

Der Zug befindet sich innerhalb oder ausserhalb eines Knotenbereichs.

Der Zug ist verspätet und soll schnellstmöglich fahren, um die Verspätung wieder einzuholen.

Bei pünktlichen Zügen ist die gleiche Anzeige möglich, um z.B. Streckenkapazität für andere verspätete Züge zu schaffen.



Energiesparstufe I

Der Zug befindet sich ausserhalb eines Knotenbereichs.

Die Betriebslage erlaubt es, dass energiesparend gefahren wird, auch wenn der Zug nicht mehr pünktlich ist, z.B. weil alle Anschlüsse auch verspätet sind.

Der Lokführer wendet die energiesparende Fahrweise in Eigenverantwortung an.



Die Vorausschau zeigt eine Kreuzung am Rotsee (ROTS) an, mit Zug IR 2328. Eine Durchfahrt ist ab 08:17:30 möglich (natürlich ist Anzeige der Durchfahrtszeit optional, da unter Umständen nicht einfach interpretierbar).

Der Zug muss insgesamt 30 Sekunden verlieren, um schlank am Kreuzungsort durchfahren zu können.



Der Zug fährt hinter der S 21165 her, und vor dem IC 674. Die Abweichung von der Idealtrasse beträgt 15 Sekunden.

Die Information über den vorausfahrenden Zug ermöglicht die korrekte Interpretation der Signalstellungen.

Die Information über den nachfolgenden Zug zeigt, dass nicht beliebig viel Zeit verloren werden darf, selbst wenn der Zug etwas vorzeitig verkehrt.



Energiesparstufe II

Gleiche Situation wie bei Energiesparstufe I.

Die Betriebslage erlaubt es, dass noch stärker energiesparend gefahren wird, z.B. durch Senkung der Geschwindigkeit, solange keine neue Meldung angezeigt wird.



Gleiche Situation wie links dargestellt. Anstelle einer Zeitabweichung wird eine empfohlene Geschwindigkeit angezeigt, hier 90 km/h. Bemerkungen zur Anzeige einer Geschwindigkeit siehe weiter unten.



Der Zug fährt vor dem IR 2914.

Damit der nachfolgende Zug nicht behindert wird, muss bis Rotkreuz (RK) schnellstmöglich gefahren werden.

2.6.3 Anzeige einer empfohlenen Geschwindigkeit

Am einfachsten sowohl für die Vorausberechnung einer Fahrt wie auch für die Umsetzung der Empfehlung durch den Lokführer ist die Anzeige einer empfohlenen Geschwindigkeit. Insbesondere bei schweren Güterzügen dürfte die Fahrt nur nach einer Zeitabweichung schwierig sein. Zudem birgt die Anzeige nur einer Zeitabweichung die Gefahr, dass die Geschwindigkeit schliesslich um den Idealwert herum pendelt und der Zug abwechselnd beschleunigt und bremst, was weder fahrdynamisch ideal noch energiesparend wäre.

Andererseits kann die Anzeige einer weiteren Geschwindigkeit auf dem Führerstand kritisch sein. Schon heute muss der Lokführer bis zu drei Geschwindigkeiten beachten und distanzabhängig priorisieren:

- Zulässige Streckenhöchstgeschwindigkeit
- Geschwindigkeitseinschränkungen durch Signalstellung (z.B. ablenkende Weichen)
- Langsamfahrstellen, z.B. bei Baustellen

Eine weitere Geschwindigkeit, noch dazu eine, die über ein nicht sicherheitsrelevantes System erzeugt und übertragen wird, könnte den Lokführer ablenken. Andererseits bildet auch eine nur schwierig umsetzbare Fahrempfehlung (wie eine Zeitabweichung, die der Lokführer in eine ideale Geschwindigkeit umrechnen muss) ebenfalls eine mögliche Quelle der Ablenkung.

Dem Aspekt der idealen Anzeige ist auf jeden Fall in einer sehr frühen Projektphase besondere Aufmerksamkeit zu schenken und alle möglichen Varianten nochmals gegeneinander abzuwägen.

3 Bisherige Validierungen

3.1 Programmierung einer Demonstrations-Software

Im Rahmen der nun vorliegenden Studie wurde aus bestehenden und einigen ergänzten Bausteinen unseres Programms für Zuglaufrechnungen **emkaTrain** eine Demonstrations-Software programmiert, mit der Netzwerksimulationen möglich sind. Einige Beispiele sind in [2] vorgestellt.

Die Programme wurden zudem so erweitert, dass Fahrten in Echtzeit auf Zügen möglich sind. Das Programm dient dann sowohl zur Nachverfolgung der Fahrt (und damit der geschätzten Geschwindigkeit) als auch für die Prognose des Zuglaufs. Durch Eingabe von Soll-Durchfahrtszeiten können auch Dispositionsvorgaben durchgespielt werden. Die Positionserfassung des Zuges erfolgt dabei manuell, durch Eingabe eines Steuerzeichens in einem periodisch eingelesenen File jeweils bei der Durchfahrt durch eine Station oder bei Vorbeifahrt an einem Signal. Aufgrund des zuletzt eingelesenen Steuerzeichens erkennt das Programm die Position des Zuges auf zwei bis drei Sekunden genau.

3.2 Vergleich mit vollständiger Zuglaufrechnung

Die Ergebnisse der schnellen Zuglaufrechnung wurden mit denjenigen der detaillierten Simulationen verglichen. Sowohl in Bezug auf die Fahrzeiten als auch auf die Energie stimmen die Ergebnisse sehr gut überein. Allerdings enthält der Algorithmus für die schnelle Rechnung bisher kein Höhenprofil der Strecken. Angesichts der geringen Steigungen im Raum Luzern spielt diese Vereinfachung bei den gezeigten Beispielen auch keine Rolle. Eine spätere Ergänzung ist ohne grossen Zusatzaufwand möglich und beeinflusst die Rechenzeit nur marginal, da die potentielle Energie nur von der Zugsmasse und der Höhendifferenz abhängt, beide Grössen im voraus bekannt und unabhängig von der Dynamik der Zugfahrt sind.

3.3 Validierung anhand von KVZ-Daten

3.3.1 Allgemeines

Die sogenannten KVZ-Daten („Kennzahlen Verkehrszeiten Züge“) aus dem SBB-Netz ordnen Durchfahrtszeiten der Züge den entsprechenden Standorten der Hauptsignale zu. Dadurch lässt sich der Lauf der Züge verfolgen. Die KVZ-Daten werden nicht ständig, sondern nur aufgrund spezieller Anfrage gespeichert. Für die vorliegende Studie konnten vorhandene Aufzeichnungen aus dem Jahr 2007 verwendet werden, die im Rahmen der Arbeiten des Instituts für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich gesammelt wurden.

Die folgenden Beispiele zeigen, dass es aufgrund dieser Durchfahrtszeiten möglich ist, für alle zu betrachtenden Zugkategorien nicht nur den Ort des Zuges bestimmen lässt, sondern mit ausreichender Genauigkeit auch die wahrscheinliche momentane Geschwindigkeit. Damit ist nachgewiesen, dass es kein echtes Geschwindigkeitssignal der Züge braucht, um das angestrebte Leitsystem für energieeffizienten Betrieb aufzubauen.

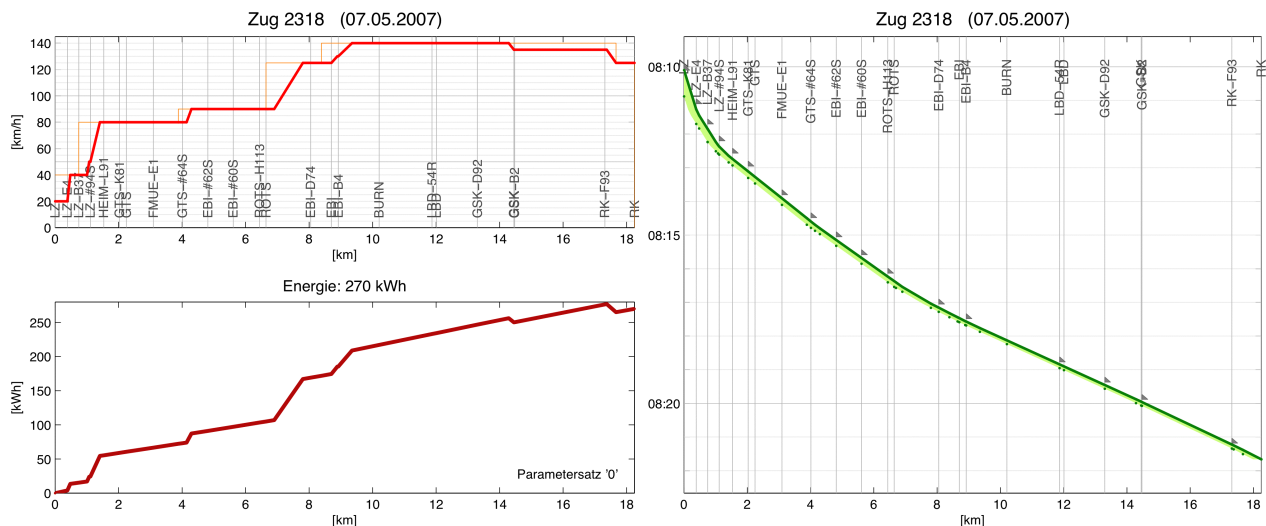
In den gezeigten Fällen ist die Geschwindigkeit natürlich erst nach Vorliegen aller Weg-/Zeitpunkte ermittelt. Für eine Prognose lassen sich jedoch die Vergangenheit (aufgrund vorliegender Messungen) und die Zukunft (aufgrund der Zuglaufrechnung und der zu erwartenden Weg-Zeit-Zwangspunkte) nahtlos zusammensetzen, wie die Versuche auf einzelnen Zügen zeigen (s. Bemerkungen unten).

3.3.2 Ungestörte Fernverkehrszüge

Die Verläufe gelten für einen Interregio Luzern – Zürich, gebildet aus einem IC 2000 (Doppelstockzug mit Lokomotive Re 460).

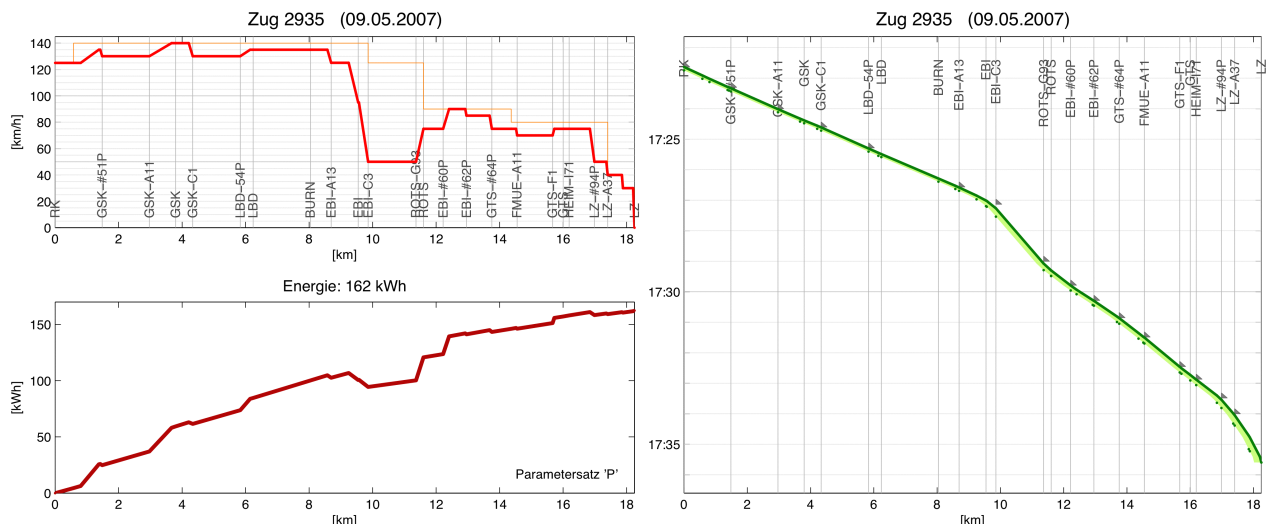
Auf den Figuren sind jeweils dargestellt:

- Links oben die nachgerechnete Geschwindigkeit gegen den Weg
- Links unten die bis zum jeweiligen Ort aufgenommene Nettoenergie, ebenfalls aus dem Rechenmodell abgeleitet
- Rechts das entsprechende Weg-Zeit-Diagramm. Die kleinen dunkelgrauen Dreiecke rechts oberhalb der grünen Linie sind (neben den „statischen“ Zug- und Streckendaten) die einzigen Eingabegrößen für den Nachvollzug der Zugfahrt.



3.3.3 Fahrten mit Konflikten

Während der Nachvollzug ungestörter Fahrten mit modernen Zügen relativ einfach erscheint, ist natürlich von besonderem Interesse, ob sich auch Züge, die durch Warnung zeigende Signale beeinflusst wurden, korrekt abbilden lassen. Auch dies ist der Fall. Das Beispiel zeigt den IR 2935, einen Zusatzzug von Zürich nach Luzern im Berufsverkehr, der mit einer Stufenschalter-Lokomotive Re 4/4 II geführt wird. Dies äussert sich an der etwas schwankenden Geschwindigkeit (die der Lokführer manuell regelt). Vor der Einfahrt in die Einspurstrecke am Rotsee sind die Abbremsung bis auf etwa 40 km/h und die anschliessende Wiederbeschleunigung deutlich sichtbar.

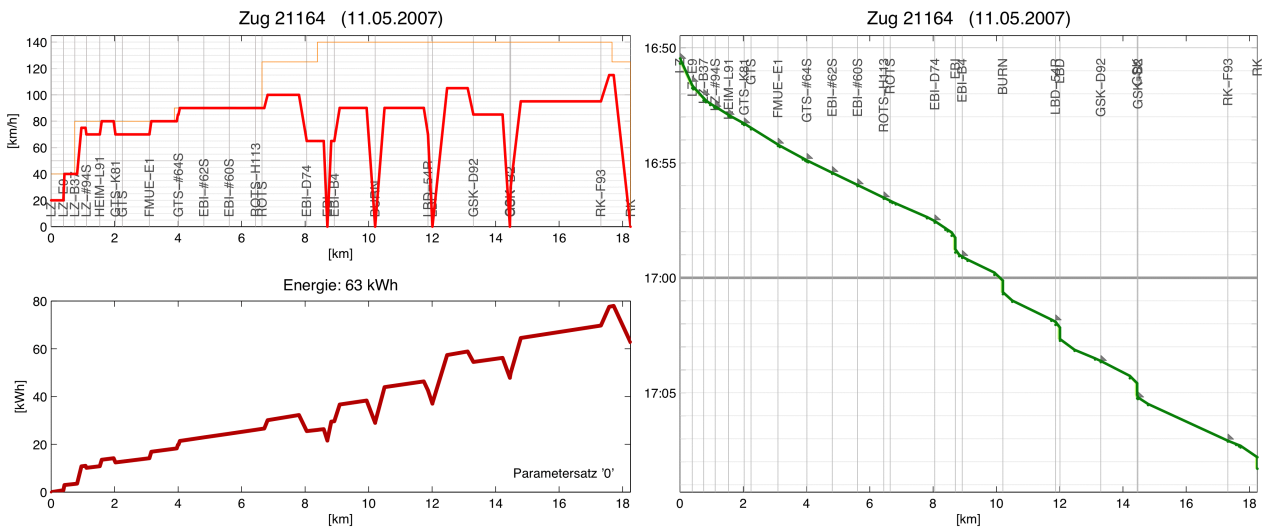


3.3.4 Regional- und S-Bahnzüge

Züge mit Halt auf vielen Stationen stellen wiederum andere Anforderungen an den Algorithmus. Während des Halts ist der Zug „unüberwacht“, da er in keinen neuen Abschnitt einfährt und damit von der Betriebsleittechnik (nach dem vorgeschlagenen Konzept) nicht mit entsprechend hoher zeitlicher Auflösung verfolgt werden kann.

Auch hier lässt sich der Geschwindigkeitsverlauf jedoch sehr präzise nachverfolgen, wie das Beispiel der mit einem FLIRT gefahrenen S1 von Luzern nach Rotkreuz zeigt. Wichtig ist natürlich auch hier, dass die Zugdaten korrekt sind. Für die Haltezeiten an den Stationen muss ein typischer Mittelwert eingesetzt werden. Hilfreich bei der Prädiktion ist, dass in der Regel kurz nach einem Halt ein neuer Abschnitt befahren wird (z.B. beim Passieren des Ausfahrtsignals), sodass der Zug nach dem mit einer Unsicherheit behafteten Hal-

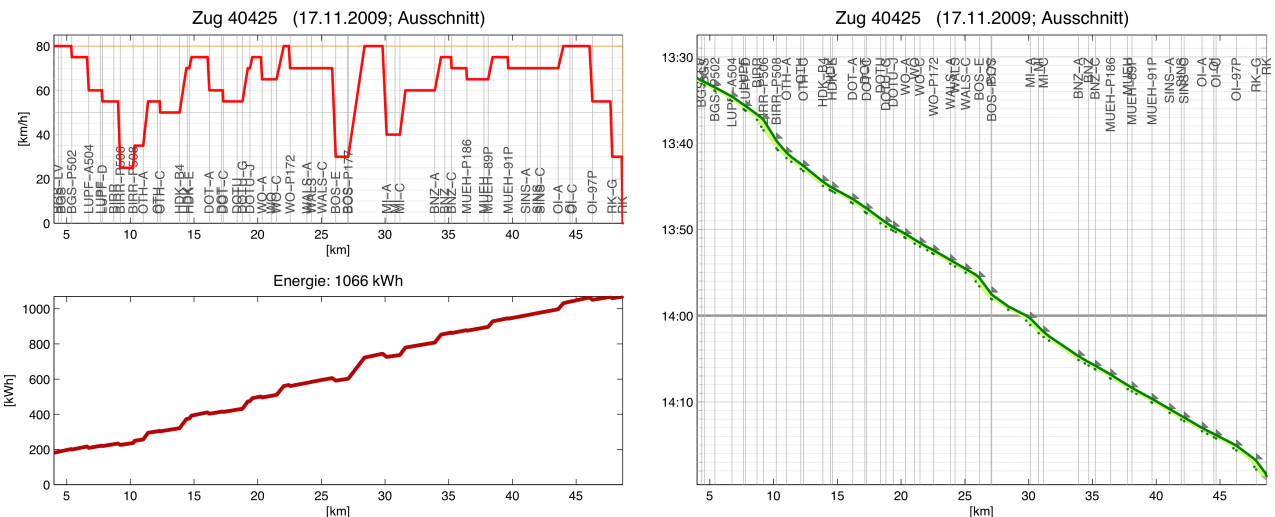
tezeit sofort wieder richtig in die Netzwerksimulation aufgenommen bzw. seine aktuelle Fahrzeit korrigiert wird.



3.3.5 Güterzüge

Das Beispiel des Güterzuges wurde nicht aus den KVZ-Daten entnommen, sondern anlässlich einer Test- und Demonstrationsfahrt mit der in dieser Studie entwickelten Testumgebung aufgezeichnet. Der Zug ist 1591 t schwer (Anhängelast, plus 84 t Lokmasse) und mit nur einer Re 482 bespannt. Die Vorbeifahrtszeiten an den Hauptsignalen wurden manuell registriert (mit einer Toleranz von zwei bis drei Sekunden). Auch hier zeigt sich, dass sich die Geschwindigkeit des Zuges in guter Näherung nachbilden lässt, ohne dass ein Geschwindigkeitssignal der Lokomotive dafür verwendet wird.

Im Raum Birr – Othmarsingen und Boswil – Muri wurde der Zug übrigens mehrfach durch quer- bzw. vorausfahrende Züge beeinflusst.



3.4 Fahrten auf Zügen

3.4.1 Reisezüge

Auf Reisezügen wurden bisher nur Fahrten nachvollzogen, von einem Abteil im vorderen Teil des Zuges aus. Fahrten auf Führerständen mit Dispositionseingriffen wurden bisher keine durchgeführt.

3.4.2 Güterzüge

Die oben gezeigte Güterzugsfahrt fand auf dem Führerstand statt. Neben der Verfolgung der Fahrt wurden auch Prognosen gerechnet und bei auftretenden Beeinflussungen eine manuell korrigiert Durchfahrtszeit eingegeben. Allerdings standen dafür in der Regel keine Vorgaben von der Betriebsführung zur Verfügung, so dass weitere Beeinflussungen (durch vorfahrende Züge) nicht ganz verhindert werden konnten. Eine gezielt geplante Durchfahrt des 1600-t-Zuges an einem Blocksignal gelang mit einer Zeitabweichung von nur 14 Sekunden, bei einer Disposition nur drei Abschnitte vorher und bei einer Verzögerung des Zuges um eine Minute. Dies ist ein durchaus realistischer Fall für Züge in dicht befahrenen Netzen.

Die Fahrten zeigten eindeutig, dass sich der schwere Güterzug aufgrund einer empfohlenen Geschwindigkeit am besten präzise führen lässt. Trotzdem muss der Lokführer die energieoptimale Fahrweise beherrschen, und nicht z.B. die empfohlene Geschwindigkeit durch eine mechanische Bremsung ansteuern.

4 Migrationsstrategie

4.1 Prinzip

Der Aufbau eines Systems für flüssigen und energieoptimalen Bahnbetrieb ist anspruchsvoll und benötigt Zeit. Weder das gesamte Netz noch alle Fahrzeuge können gleichzeitig ausgerüstet werden. Zudem empfiehlt es sich, auch funktional nicht alles auf einmal aufzubauen. Einige Schritte, wie eine automatische Fahrstrassenwahl aufgrund von Zeit- und Energiekriterien ist komplexer als nur die Übertragung eines erkannten Konflikts (wie z.B. eines vorausfahrenden Zuges) auf den Führerstand.

Sinnvoll ist deshalb die Realisierung des Systems in verschiedenen Schritten. Dabei muss jedoch der Endausbauzustand konzeptionell und von den Schnittstellen her bereits zu Beginn bekannt sein. Die einzelnen Schritte werden dann so gewählt, dass jeweils mit geringstem Aufwand das bestmögliche Ergebnis erreicht werden kann, und so, dass die bereits bestehenden Teilsysteme später weiter verwendet werden können.

4.2 Realisierung in Stufen

Stufe	Stichwort	Kurzbeschreibung
A	Manuelle Lenkung und Information	Der Fahrdienstleiter / Disponent erkennt mögliche Konflikte und orientiert den Lokführer. Dieser passt seine Fahrweise an. Es werden ausser dem Zugfunk / GSM-R keine speziellen technischen Hilfsmittel benötigt. Diese Stufe entspricht heutiger Praxis und wird im Herbst 2009 bei den SBB anhand einer speziellen Broschüre dem Betriebsleit- und Lokpersonal wieder vermittelt.
B	Automatische Konflikterkennung	Die flächendeckende Erkennung und präzise Vorhersage von Konflikten wird automatisch aus dem Betriebsgeschehen durchgeführt und ebenfalls automatisch aufbereitet und für den Fahrdienstleiter / Disponenten angezeigt. Dieser priorisiert die Meldungen und orientiert die Lokführer. Der Fahrdienstleiter / Disponent wird dadurch gegenüber Stufe A entlastet, es können mehr Züge mit genauerer Information versorgt werden. Dazu wird ein zusätzlicher Prädiktor für den Betriebsablauf benötigt. Dieser bezieht Informationen aus dem Betriebsleitsystem, wirkt aber nicht darauf zurück. Investitionen beschränken sich nur auf die Infrastrukturseite. Durch die Zwischenschaltung der Fahrdienstleiter / Disponenten ist es möglich, Erfahrungen mit dem Prädiktionsprozess zu sammeln.
C	Automatische Übermittlung an die Züge	Zusätzlich zu Stufe B wird die aufbereitete Information automatisch an die Züge geschickt und dort angezeigt. Dadurch ist es möglich, nicht nur die wichtigsten Konflikte zu übertragen, sondern auch eine Empfehlung zur Fahrweise („Energiesparstufe“) und eine Abweichung von der Sollzeit auch bei veränderter Betriebslage. Auf den Zügen werden neu auch die Anzeigegeräte benötigt, ausserdem die Datenübertragung. Der Prozess ist jedoch nach wie vor rückwirkungsfrei, was die Anlagen der Betriebsführung betrifft (mit Ausnahme der bereits heute durchgeführten Aktionen, wie Abtausch der Fahrlage von zwei Zü-

		gen).
D	Automatische Fahrstrassenwahl	Neu gegenüber Stufe C werden die aus dem Prädiktor abgeleiteten Informationen innerhalb der Betriebsleitung rückgekoppelt und dadurch die optimale Wahl der Fahrstrassen und –reihenfolge abgeleitet. Auf Infrastrukturseite muss der Prädiktor erweitert (Berechnung aller kombinatorischen Möglichkeiten) und die Schnittstelle zur entsprechenden automatischen Anforderung der Fahrstrassen geschaffen werden. Auf Fahrzeugseite und bei der Datenübertragung zwischen Fahrzeugen und Infrastrukturseite ändert sich nichts mehr.
(E)	Automatische Zugführung	Als theoretisch letzter Schritt könnte die auf dem Zug empfangene Information für eine automatische Zugführung verwendet werden. Auf diesen Schritt wird explizit verzichtet, da solche Systeme für Vollbahnen weder angestrebt werden noch für eine flächendeckende Anwendung bezahlbar wären.

Aktuell planen die SBB Erweiterungen im Dispositionssystem RCS entsprechend der Stufe B. Zu Stufe C haben die SBB das Projekt Adaptive Lenkung (ADL) gestartet.

5 Empfehlungen für die Systementwicklung

5.1 Interoperabilität

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen, der Entwicklung der Demonstrationsumgebung und der vielen während der Studie geführten Gespräche möchten wir abschliessend ein paar Empfehlungen geben für die künftige Entwicklung eines solchen Systems.

Dies betrifft zunächst die Frage der Interoperabilität, also das Zusammenwirken zwischen der Infrastruktur und Fahrzeugen verschiedener Hersteller und Betreiber:

- Obwohl die SBB heute noch eine integrierte Bahn sind (also mit Infrastruktur, Personen- und Güterverkehrsunternehmen unter dem gleichen Dach), fahren doch eine Vielzahl von anderen Verkehrsunternehmen auf dem gleichen Netz. Die Einführung eines Systems zur energieoptimierten Betriebsführung (bzw. allgemein zur Verflüssigung des Verkehrs) hat nur Erfolg, wenn möglichst viele Verkehrsunternehmen mitmachen.
- Dies schliesst es aus, dass proprietäre Fahrzeuggeräte eingebaut werden. Da deren Einsatz wohl kaum rechtlich erzwungen werden kann, muss für die Verkehrsunternehmen genügend Anreiz bestehen, trotzdem mitzumachen. Auch wenn in einer Studie von grossen Einsparungen beim Verschleiss oder beim Energieverbrauch die Rede ist, findet das in der Realität doch nur dann statt, wenn die benötigten Endgeräte bereits vorhanden (z.B. Zugfunk, GSM-R) oder äusserst kostengünstig sind (GSM-Endgeräte).
- Damit entfällt auch die Möglichkeit der Datenrückkopplung von den Zügen an die Betriebsleitung zum Zweck der fahrzeit-, kapazitäts oder energieoptimalen Betriebssteuerung. Dass dies grundsätzlich möglich ist, wurde im Rahmen dieser Studie gezeigt. Eine Validierung für eine grössere Anzahl Fahrten steht aber noch aus.
- Zudem soll die Datenschnittstelle zwischen Infrastruktur (Betriebsführung) und Fahrzeugen (Empfangsgerät) so gestaltet sein, dass sie transparent ist. Damit lassen sich z.B. bereits vorhandene oder geplante, proprietäre Geräte (d.h. von Fahrzeugherstellern oder anderen Bahnen entwickelte, [7, 8, 9]) in das System mit einbinden.
- Eine einfache Datenschnittstelle muss natürlich wohlüberlegt sein. Sie muss jedoch auch die Möglichkeit einer späteren Änderung bieten. Nur so wird es möglich, in einem einzelnen Land ein System möglichst flächendeckend aufzubauen, bevor in Europa alles harmonisiert ist (was noch viele Jahre dauern dürfte). Und umgekehrt wird so eine spätere, sinnvolle Harmonisierung möglich, auch wenn in einzelnen Ländern schon Systeme bestehen.

5.2 „Rapid Prototyping“

Ebenfalls aufgrund der Erkenntnisse der Studie, sowie aus der Erfahrung aus anderen Projekten, empfehlen wir, bei der Entwicklung des Systems zunächst ein möglichst komplettes Demonstrationssystem aufzu-

bauen. Anders als beim von den SBB aufgebauten System „PIK-FARE“ (Pünktlichkeit im Kernnetz / Fahrtregelung), das mit einem proprietären, bereits weit entwickelten Gerät inklusive Datenschnittstelle und Dispositionssoftware arbeitete, sollte dieses Demonstrationssystem jedoch vollständig unabhängig von der für die definitive Version geplanten Hard- und Software sein.

Die Erstellung solcher Entwicklungsumgebungen ist unter dem Begriff „Rapid Prototyping“ bekannt. Gemeint ist damit ein System mit möglichst voller Funktionalität, aber losgelöst von allen Zwängen der sauberen Anbindung an alle echten Geräte, der Verwendung von spezifischer Hardware etc.

Dass sich mit einfachsten Mitteln die wichtigsten Betriebsfälle durchspielen lassen, konnten wir mit unserer Demonstrationssoftware zeigen. Offene Fragen zur Anzeige auf dem Führerstand, zur Interaktion zwischen Anzeige und Fahrweise, oder zur Aufbereitung der Informationen auf Infrastrukturseite lassen sich auf gleiche Weise behandeln. Erst wenn darüber Klarheit besteht, lohnt es sich, die Entwicklung des Systems und aller seiner Teile definitiv zu starten. Eine durch einen unabhängigen Prototyp verursachte Verzögerung oder Verlängerung der eigentlichen Entwicklung wird dank der frühen Beseitigung von Unklarheiten in späteren Phasen auf jeden Fall wieder eingeholt.

6 Literatur

- [1] M. Meyer, M. Lerjen, S. Menth: Verifizierung der Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugsmangement. Schlussbericht des Projektes 102645 im Auftrag des Bundesamts für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität, vom 26.11.2009
- [2] M. Lerjen, M. Meyer: Energieeffiziente Eisenbahn-Betriebsführung: Simulationen. *emkamatik*-Dokument 09-0315, Version 1 vom 26.11.2009
- [3] 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
- [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
- [5] M. Lüthi: Improving the Efficiency of Heavily Used Railway Networks through Integrated Real-Time Rescheduling, Dissertation, IVT, ETH Zürich, 2009.
- [6] S. Roos: Bewertung von Knotenmanagement-Methoden für Eisenbahnen. Diplomarbeit am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich, Januar 2006
- [7] Prorail: RouteLint (<http://www.routelint.nl>)
- [8] P. Buchwald: GEKKO, Guide to Energy Efficient Driving. Presentation at the Energy Efficiency Days 2009, Tours (France), 23. – 26.9.2009 (<http://www.energy-efficiency-days.org>)
- [9] Bombardier Transportation: EBI Drive 50 Driver Assistance System (<http://bombardier.com/en/transportation>)

Versionsinformation

--	21.11.2009	MM	Version für Review
1	26.11.2009	ML	Schlussversion