



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht, Anhang 3 26. November 2009

Verifizierung der Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugmanagement

Messungen auf Fahrzeugen und Hochrechnungen

Energieeffiziente Eisenbahn-Betriebsführung:

Messungen auf Fahrzeugen und Hochrechnungen

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, nach einer Einführung zu den in Betracht gezogenen Möglichkeiten und der Methodik, die Ergebnisse der Auswertungen von Langzeit-Betriebsmessungen, die während eines mehrwöchigen Einsatzes von zwei Re 460 der SBB durchgeführt wurden.

1 Einführung

Ein Hauptziel des Projekts war die Quantifizierung der möglichen Energieeinsparungen, falls die den Lauf der Züge behindernden Beeinflussungen durch andere Züge möglichst weitgehend vermieden werden können. Dazu braucht es zunächst die Energiewerte für die Beeinflussung eines einzelnen Zugs in Funktion der Anfangs- und Endgeschwindigkeit und der Zugdaten. Dies lässt sich zuverlässig simulieren. Für die möglichst netzweite Hochrechnung ist jedoch ausschlaggebend, wie oft solche Beeinflussungen überhaupt auftreten, bei welchen Geschwindigkeiten, wie die Lokführer bremstechnisch damit umgehen, und wie viele davon sich vermeiden lassen.

Präzise Erhebungen zu dieser Fragestellung lassen sich nur mit Messungen auf Fahrzeugen durchführen. Ein wichtiger Baustein der Studie waren deshalb solche Messungen. Der vorliegende Teilbericht enthält deshalb die Beschreibung des Vorgehens und die Resultate der schliesslich auf Lokomotiven des Typs Re 460 der SBB durchgeführten Messungen.

2 Evaluation möglicher Fahrzeuge

2.1 Anforderung

Bei der Wahl der Fahrzeuge, auf denen eine Messung installiert werden soll, stellten die aufzuzeichnenden Signale die wichtigste Anforderung. Es sind dies:

- Fahrgeschwindigkeit; daraus lässt sich auch der zurückgelegte Weg berechnen
- Zug- und Bremskraft elektrisch
- Druck in der Hauptleitung der pneumatischen Bremse

Eine Energiemessung ist explizit nicht nötig. Energiezähler mit Abtastraten von 5 oder 15 Minuten könnten ohnehin keinen Aufschluss über einzelne Beeinflussungen durch Signale geben. Aus den aufgezeichneten Verläufen der Geschwindigkeit und Zug-/Bremskraft über der Zeit lässt sich dagegen bei Bedarf der Verlauf der aufgenommenen und abgegebenen Traktionsenergie ausreichend genau simulieren.

Die Aufzeichnung der genannten Signale lässt sich auf älteren Fahrzeugen nur mit einigem messtechnischen Aufwand durchführen. Somit standen von Beginn an vor allem moderne Umrichter-Triebfahrzeuge im Vordergrund. Dort lassen sich die verlangten Signale als Prozesswerte aus der Leittechnik auslesen und auf einem Computer mittels geeigneter Software speichern. Die Aufzeichnung muss unbegleitet und über einen längeren Zeitraum möglich sein.

Aufgrund dieser Anforderung kamen keine Messungen auf Güterzügen in Frage. Die modernen Lokomotiven Re 482 von SBB Cargo sind grenzüberschreitend auch in Deutschland im Einsatz und in der Schweiz fast nur auf der Linie Basel – Arth-Goldau anzutreffen. Die älteren Lokomotiven Ae 6/6, Re 4/4 II und III und Re 6/6 wären wie erwähnt nur aufwendig auszurüsten. Somit beschränkte sich die Auswahl auf Triebfahrzeuge des Personenverkehrs.

2.2 Mögliche Fahrzeugtypen

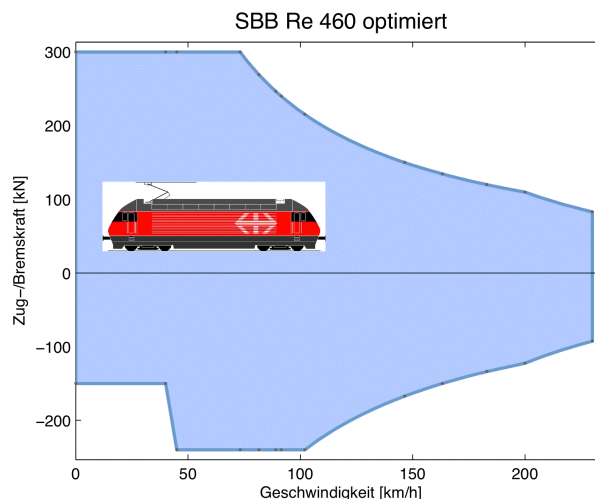
Die folgenden Triebfahrzeuge wurden in die Evaluation einbezogen:

- **Re 460.** Diese Lokomotiven leisten heute einen grossen Anteil des Fernverkehrs der SBB und eignen sich technisch für solche Untersuchungen. Die Messungen wurden schliesslich auf Re 460 durchgeführt.
- **ICN.** Messungen können in gleicher Art wie auf der Re 460 durchgeführt werden. Dies wurde zunächst ebenfalls erwogen. Durch die Ausrüstung der Züge mit dem Ferndiagnosesystem „Orbita“ von Bombardier Transportation besteht heute sogar die Möglichkeit der Fernabfrage. Einzelne Datensätze konnten tatsächlich beschafft werden. Allerdings war die Anzahl schliesslich zu gering, und der funktionsfähige Einsatz zu spät, um für die Studie noch repräsentative Daten zu erhalten.
- **FLIRT.** Diese S-Bahn-Züge stehen im Raum Basel / Olten und in der Zentralschweiz im Einsatz, jedoch nur im Regional- und S-Bahnverkehr. Eine messtechnische Ausrüstung wäre möglich. Aufgrund der beschränkten Aussagekraft (regional und Verkehrsart) wurde aber auf eine Weiterverfolgung verzichtet.
- **DTZ.** Diese S-Bahn-Doppelstockzüge stehen nur im Raum Zürich im Einsatz und wurden nicht weiter in die Untersuchungen einbezogen.
- **NPZ „Domino“.** Durch den Umbau aus den NPZ-Zügen für den Regionalverkehr würde sich dank der neuen Leittechnik auch hier die Möglichkeit von Messungen bieten. Dies wurde ebenfalls konkret in Betracht gezogen. Durch die Lieferverzögerung der umgebauten Züge und personelle Engpässe beim Lieferanten der neuen Leittechnik wurden Messungen auf diesen Zügen jedoch ebenfalls nicht weiterverfolgt.

Ältere Triebfahrzeuge (Lokomotiven Re 4/4 II und Re 450, Pendelzüge NPZ vor dem Umbau) schieden auch hier aus Aufwandsgründen aus.

Gewählt wurde somit die Lokomotive Re 460. Es wurden zwei von denjenigen Lokomotiven ausgerüstet, die als erste mit der neuen Software ausgerüstet wurden, die im Rahmen des Energiesparprogramms der SBB eine Reduktion der Verluste im Antriebsstrang und eine leicht erhöhte elektrische Bremsleistung ermöglicht [3]. Zudem sind, wie die Auswertung der Lokführerbefragungen zeigen [5], die erwarteten Einsparungen durch Vermeidung von Beeinflussungen im Fernverkehr am grössten.

Die Figur zeigt das Geschwindigkeits-Zugkraft-Diagramm der Re 460 der SBB.



3 Messungen auf der Re 460

3.1 Messaufbau

Alle geforderten Messsignale sind auf dem Fahrzeugbus und den daran angeschlossenen Rechnern als Prozesswerte verfügbar. Das damals von ABB Verkehrssysteme (heute Bombardier Transportation) entwickelte System „MicView“ erlaubt es, beliebige Signale auf einem zusätzlich angeschlossenen PC zu visualisieren und auch zu speichern.

Für die Messungen auf der Re 460 wurde durch Fachleute des Industriewerks Yverdon der SBB ein Laptop-Computer in einen Koffer eingebaut, der auch eine Speisung mit Wechselrichter aus der Fahrzeugbatterie enthält. Dieser Koffer wurde in einem Apparateschrank der betreffenden Lok eingeschlossen und zeichnete dauernd Messdaten auf. Aufgrund eines Steuersignals (Hauptschalter aus) wurde jeweils ein Messfile abgeschlossen und ein neues gestartet. Die Messdaten mussten in etwa wöchentlichem Abstand von Hand auf einen anderen PC übertragen werden. Das Vorgehen war damit grundsätzlich gleich wie das schon im Rahmen der Arbeit [4] angewandte.

Neben den für die Auswertung der Beeinflussungen notwendigen Signalen wurden weitere aufgezeichnet, die der Beurteilung der neuen „Energiesparsoftware“ dienten (z.B. Zwischenkreisspannung, Fahrmotorfluss) [2].

3.2 Aufbereitung der Messsignale

Die durch „MicView“ aufgezeichneten Signale liegen in ASCII-Files als Vektoren gegen die Zeit vor. Bevor die Daten systematisch im Hinblick auf die Beeinflussung des Zuges ausgewertet werden konnten, waren die folgenden Schritte der Datenaufbereitung nötig:

- Konversion nach Matlab
- Darstellung gegen den zurückgelegten Weg statt gegen die Zeit
- Herausschneiden jeweils einer Fahrt zwischen definiertem Anfangs- und Endbahnhof, teilweise aus mehreren Originalfiles zusammengesetzt
- Möglichst präziser Korrelation der Position des Zuges gegenüber dem Verlauf der Strecke, damit die Fahrt gegenüber den Stationen, Signalen und der zulässigen Maximalgeschwindigkeit korrekt dargestellt ist.

Das im nächsten Kapitel dargestellte Muster zeigt beispielhaft das Ergebnis der Aufbereitung für den Ausschnitt einer Fahrt.

3.3 Beurteilung der Fahrtverläufe

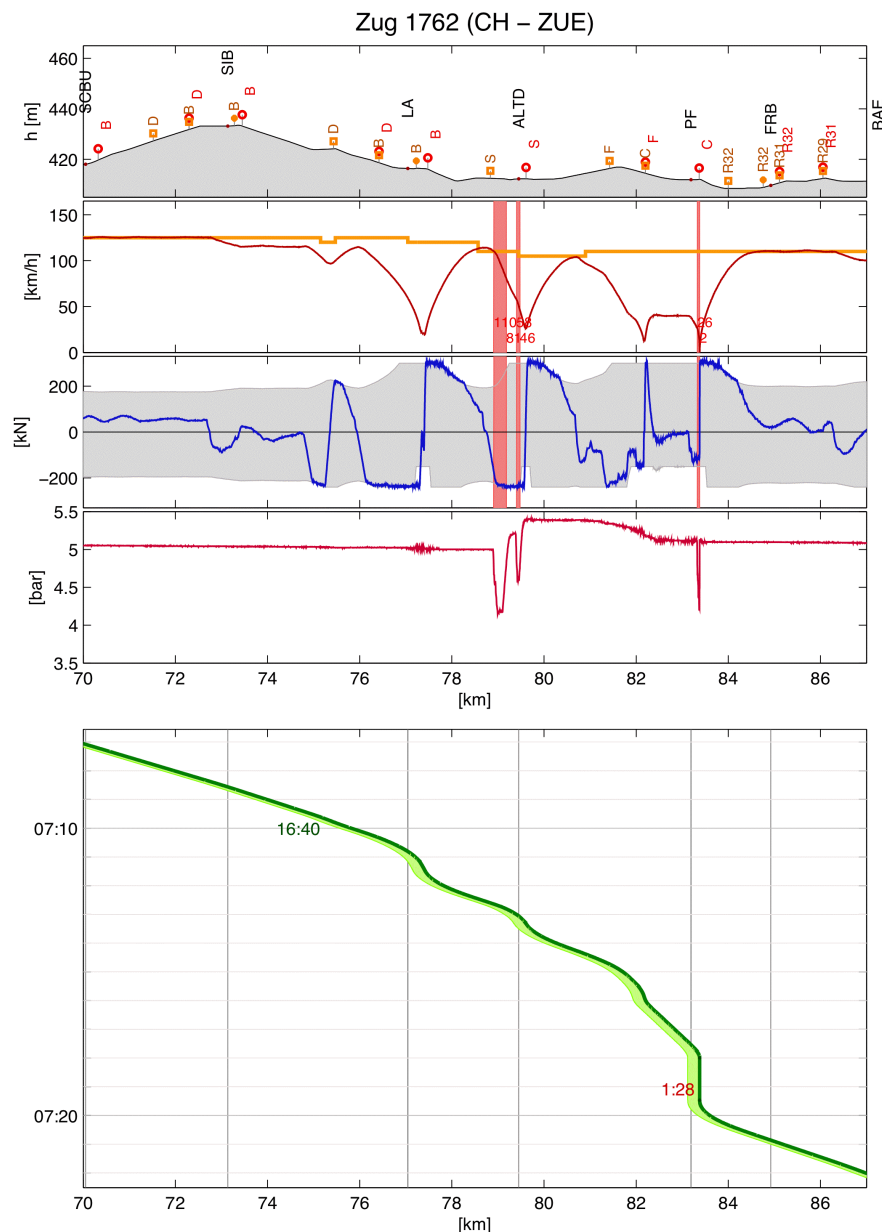
Der Aufwand zur Erstellung einer Software für die zuverlässige Erkennung von Beeinflussungen wäre für die auszuwertende Anzahl von Fahrten viel zu gross. Die Fahrten wurden deshalb einzeln aufgrund einer standardisierten Darstellung beurteilt, was zwar zeitaufwendig ist, aber zu sehr zuverlässigen Ergebnissen führt. Mit entsprechender Kenntnis des Bahnbetriebs und der normalen Fahrweise der Lokomotivführer lässt sich meistens eindeutig erkennen, was auf der betreffenden Fahrt geschah.

Die Darstellungen enthalten:

- Das Höhenprofil der Strecke (über unser Tool **emkaTrain** übernommen aus den elektronischen Streckendaten der SBB), mit den eingetragenen Orten der Stationen und der Signale.
- Die Geschwindigkeit des Zuges (rote Linie) und die am betreffenden Ort gültige Höchstgeschwindigkeit (orange). Rote vertikale Balken zeigen an, dass der Zug mechanisch gebremst wurde.
- Die Zugkraft bzw. elektrische Bremskraft der Lokomotive (blaue Linie), hinterlegt mit der bei der betreffenden Geschwindigkeit möglichen Zug- oder Bremskraft (graue Fläche).
- Der Druck in der Hauptleitung der pneumatischen Bremse (dunkelrote Linie). Diese Leitung geht durch den ganzen Zug. Bei einem Druck von 5 bar sind alle mechanischen Bremsen (Scheibenbremsen bei modernen Wagen, Klotzbremsen bei älteren) gelöst. Unter 4.6 bis 4.7 bar setzt die Bremswirkung ein, 3.5 bar entspricht der maximal möglichen Bremsung. Druckwerte über 5 bar dienen dem schnellen Lösen der Bremse (schnellere Druckfortpflanzung entlang der Leitung im Zug).

Die Darstellung des Hauptleitungsdrucks ist wichtig im Hinblick auf die Beurteilung der durch eine Bremsung in den mechanischen Bremsen in Wärme umgewandelten Energie.

Anhand des Interregio-Zuges 1762 von Chur nach Zürich wird im folgenden Beispiel gezeigt, wie die Beurteilung einer Fahrt abläuft.



Der Verlauf der Fahrt ist aus den Darstellungen gut nachvollziehbar:

- Der Lokführer ist über die Betriebssituation nicht orientiert und fährt ab Ziegelbrücke bis zur Station Siebnen-Wangen (SIB) mit der zulässigen Strecken-Höchstgeschwindigkeit.
- In Siebnen-Wangen reduziert er die Geschwindigkeit von sich aus von 125 auf 115 km/h, vermutlich weil regelmässig mit Beeinflussungen durch den vorausfahrenden Zug zu rechnen ist.
- Das Einfahr-Vorsignal D von Lachen (LA) zeigt Warnung. Der Lokführer leitet rechtzeitig eine rein elektrische Bremsung ein. Kurz vor der Vorbeifahrt schaltet das Signal nach, der Lokführer beschleunigt wieder.
- Das Ausfahr-Vorsignal B von Lachen zeigt wieder Warnung. Wieder leitet der Lokführer rechtzeitig eine rein elektrische Bremsung ein. Angesichts der relativ langen Vorsignaldistanz und der rechtzeitigen Bremsung ist die elektrische Bremse allein ausreichend. Bei einer Geschwindigkeit von nur noch 20 km/h schaltet das Ausfahrtsignal auf grün, der Zug beschleunigt wieder.
- Das Vorsignal zum Blocksignal S in Altendorf (ALTD) zeigt wieder Warnung. Hier ist der Bremsweg kürzer, und zusätzlich zur elektrischen Bremse kommen auch die Scheibenbremsen der Wagen zum Einsatz (sichtbar am abgesenkten Hauptleitungsdruck). Bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h schaltet auch dieses Signal nach, und der Zug beschleunigt wieder auf die zulässige Geschwindigkeit.

- Auch das Einfahr-Vorsignal F in Pfäffikon SZ (PF) zeigt wieder Warnung. Diesmal ist die elektrische Bremse allein wieder ausreichend. Bei rund 15 km/h schaltet das Signal nach.
- Das Ausfahr-Vorsignal C in Pfäffikon zeigt wiederum Warnung. Aufgrund der Vorschriften für die sichere Zugführung darf der Zug nach einem Warnung zeigenden Vorsignal auf maximal 40 km/h beschleunigen und muss die gesamte Strecke bis zum vorgesehenen Halteort in Pfäffikon mit 40 km/h zurücklegen. Dadurch geht zwar keine Energie mehr, aber nochmals Zeit verloren.

Vermutlich ist dem IR 1762 die verspätete S2 18226 vorausgefahren (Pfäffikon SZ an 07:13 nach Fahrplan). Durch die mehrfache Beeinflussung geht nicht nur Energie verloren (rund 122 kWh in diesem Beispiel), der zuvor pünktliche IR 1762 wird auch zusätzlich verspätet.

Wäre der Zug mit einem geeigneten System zur Orientierung über die Betriebslage ausgerüstet gewesen, wäre die gleiche Fahrt wie folgt abgelaufen:

- Ein einfaches System hätte den Lokführer des IR 1762 etwa bei der Durchfahrt in Siebnen-Wangen orientiert, dass vor ihm die S2 18226 fährt. Er hätte dann von sich aus die Geschwindigkeit auf die mittlere Geschwindigkeit der der S2 reduziert. Damit wäre der grösste Nutzen bereits erreicht.
- Ein vollständiges System hätte den Lauf der S2 laufend überwacht und dem IR 1762 ab Ziegelbrücke angepasste Fahrempfehlungen gegeben.

Der gezeigte Fall ist ein sehr illustratives Beispiel. In den meisten Fällen erfolgen keine solchen mehrfachen Beeinflussungen unmittelbar nacheinander. Anhand von diesem Beispiel lassen sich jedoch alle relevanten Effekte gut zeigen (Art der Bremsung, Wiederbeschleunigung auf volle oder reduzierte Geschwindigkeit, vorgezogene oder bei rechtzeitiger Orientierung „unnötige“ Bremsung).

3.4 Klassierung der Beeinflussungen

Aus dem gezeigten Beispiel wird deutlich, dass sich die vollständige Auswertung der aufgezeichneten Fahrten nicht ohne weiteres automatisieren lässt. Die Beurteilung der Beeinflussungen muss „manuell“ für jeden einzelnen Fall geschehen. Während dieser Beurteilung der Fahrten wurde deshalb eine Tabelle erstellt, in der die wichtigsten Erkenntnisse für jede Fahrt kompakt zusammengestellt sind. Der folgende Ausschnitt zeigt das gewählte Vorgehen.

A	B	C	D	E	F	G
2009-08-21	2303	ZUE	LZ	IC2000_9_EWIVA_ICBt		
	2310	LZ	ZUE	IC2000_9_EWIVA_ICBt		
	2311	ZUE	LZ	IC2000_9_EWIVA_ICBt		[90,30]
	2320	LZ	ZUE	IC2000_9_EWIVA_ICBt		
	2321	ZUE	LZ	IC2000_9_EWIVA_ICBt	[90,50]	
	2330	LZ	ZUE	IC2000_9_EWIVA_ICBt	[95,25]	
	2331	ZUE	LZ	IC2000_9_EWIVA_ICBt		
	2338	LZ	ZUE	IC2000_9_EWIVA_ICBt	[80,20 120,50]	
	2341	ZUE	LZ	IC2000_9_EWIVA_ICBt	[120,60]	
	2348	LZ	ZUE	IC2000_9_EWIVA_ICBt	[80,0]	
	2349	ZUE	LZ	IC2000_9_EWIVA_ICBt		
	2358	LZ	ZUE	IC2000_9_EWIVA_ICBt	[80,0]	[160,50]
	2359	ZUE	LZ	IC2000_9_EWIVA_ICBt		
	2370	LZ	ZUE	IC2000_9_EWIVA_ICBt	[80,0]	
	2375	ZUE	LZ	IC2000_9	[150,40]	[95,35]
	2382	LZ	ZUE	IC2000_9		
	2383	ZUE	LZ	IC2000_9		
	2390	LZ	ZUE	IC2000_9		
	2391	ZUE	LZ	IC2000_9		

Die Kolonnen A bis D enthalten Datum, Zugnummer, Start- und Zielort. Die Kolonne E definiert einen Code für die Zugskomposition, die aus dem System CERES der SBB für jeden gefahrenen Zug bekannt ist. Die Kolonnen F und G enthalten schliesslich die manuell ausgelesenen Beeinflussungen, jeweils mit Anfangs- und Endgeschwindigkeit. [90,50] heisst beispielsweise, dass der Zug durch eine Signalbeeinflussung von 90 auf 50 km/h bremsen musste. Bei den in der Kolonne F eingetragenen Fällen kamen auch die mechanischen Bremsen im Zug zum Einsatz, während bei Fällen in der Kolonne G ausschliesslich mit der elektrischen Bremse der Lokomotive gebremst wurde.

3.5 Methode der Energieauswertung

Zur Quantifizierung der Energieeinsparung durch die Vermeidung von Zugbeeinflussungen wird jede gemessene Einzelfahrt (entsprechend einer Zeile in der oben dargestellten Tabelle) folgendermassen ausgewertet:

- Bezugsgrösse zur Beurteilung von Beeinflussungen ist der simulierte Energieverbrauch einer unbeeinflussten Fahrt mit den im Fahrplan vorgesehenen Stationshalten und Fahrzeiten. Beim für die Simulation gewählten Fahrstil wird für alle vorhersehbaren Bremsungen (im unbeeinflussten Fall nur Stationshalte und Geschwindigkeitsreduktionen) die mechanische Bremse erst unterhalb von 40 km/h eingesetzt. Darüber wird rein elektrisch gebremst. Diese „schnellstmögliche ökonomische Fahrweise“ wurde auch als Referenz für die BFE-Studie 2007 [2] und 2008 bei der Schulung der Lokführer verwendet. Sie wird heute mehrheitlich in der Praxis so angewandt.
- Anschliessend wird der durch die identifizierten Beeinflussungen entstehende zusätzliche Energieverbrauch berechnet. Dies geschieht durch Differenzbildung zweier Zuglaufrechnungen: bei der ersten wird ein künstlicher, horizontaler Gleisabschnitt durchfahren mit konstanter Geschwindigkeit befahren, was der unbeeinflussten Situation entspricht. Bei der zweiten wird der Zug auf die ermittelte Beeinflussungsgeschwindigkeit abgebremst, fährt dann 100 m mit dieser Geschwindigkeit (entspricht der Annäherung und Passieren des Konfliktpunktes) und beschleunigt anschliessend wieder. Dabei wird bei der Abbremsung der in der Messung ermittelte Einsatz der mechanischen Bremse berücksichtigt, indem in der Simulation der Fahrstil unterschiedlich vorgegeben wird.
- Die Geschwindigkeit nach dem Wiederbeschleunigen entspricht dem Mittelwert zwischen derjenigen vor der Beeinflussung und der Zielgeschwindigkeit bei der Beeinflussung. Dadurch wird die Tatsache berücksichtigt, dass viele Beeinflussungen vorzeitigen Geschwindigkeitsreduktionen entsprechen, die im Verlauf der Fahrt wenig später ohnehin durchgeführt werden müssten.
- Bei Fahrten ohne Beeinflussung ist die konfliktbedingte Zusatzenergie natürlich Null.
- Zur Bestimmung der prozentualen Differenz wird der Zusatz-Energieverbrauch der Beeinflussung bezogen auf die unbeeinflusste Fahrt.

Grundsätzlich wäre es auch möglich, den Mehrenergiebedarf aufgrund von Beeinflussungen aus dem tatsächlichen Verlauf der aufgenommenen und zurückgespeisten Energie zu berechnen, und auf die tatsächliche Energiebilanz am Ende der Fahrt zu beziehen. Dies wäre aber nicht nur sehr viel aufwendiger, sondern hätte den systematischen Nachteil, dass dadurch der individuelle Fahrstil der einzelnen Lokführer mit in die Auswertung eingeht und vermutlich sogar einen dominierenden Einfluss gewinnt. Um eine derartige Verfälschung auszuschliessen, wurde das beschriebene Verfahren mit der systematischen Klassierung der Beeinflussungen und dem Vergleich durch Simulation gewählt.

4 Ergebnisse der Messungen auf der Re 460

4.1 Vorliegende Messdaten

Auf den beiden Lokomotiven Re 460 035 und Re 460 066 wurden nacheinander während insgesamt 25 Tagen mit dem beschriebenen MicView-Aufzeichnungsgerät Daten erfasst.

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über die ausgewerteten Fahrten und die Eigenschaften der entsprechenden Strecken. Gemäss der Einsatzplanung der beiden Lokomotiven stammen die meisten Fahrten von der Strecke Zürich – Luzern (im Rahmen des Software-Validierungsprozesses für ETCS durfte die Lok mit der neuen Software zunächst keine ETCS-Strecken befahren). Anschliessend wurde darauf geachtet, dass sie während der verbleibenden Messperiode auf verschiedenen Strecken verkehren, damit die charakteristischen Eigenschaften der entsprechenden Abschnitte ermittelt werden konnten. Bei fast allen Fahrten waren die Loks in IC-2000-Pendelzügen eingesetzt (zum Teil mit Verstärkungsmodul), nur die Fahrten Zürich – Basel waren lokbespannte Züge mit Eurocity-Wagen.

Strecke	Eigenschaften
Zürich – Luzern	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einspur Horgen Oberdorf – Litti und am Rotsee ▪ Niveaugleiche Kreuzung Thalwil auf Seite Nidelbad ▪ Netzknoten Fluhmühle – Gütsch – Luzern ▪ Mischbetrieb mit S-Bahn, fast keine Güterzüge
Zürich – Chur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einspur am Walensee ▪ Mischbetrieb mit S-Bahn (v. a. bis Ziegelbrücke) und Güterzügen (bis Sargans) ▪ Entspannte Situation Sargans – Chur

Zürich – Basel (via Aarau oder Brugg)	<ul style="list-style-type: none"> Sehr dichter Betrieb auf der ganzen Strecke Mischbetrieb mit allen Zugkategorien Fahrten im Bündel mit 2 Minuten Zugfolgezeit
Zürich – Genève Aéroport	<ul style="list-style-type: none"> Sehr dichter Betrieb Zürich – Bern und Lausanne – Genève Dort Mischbetrieb mit allen Zugkategorien Durchfahrt der grossen Knoten Zürich, Olten, Bern, Lausanne Fahrten im Bündel mit 2 Minuten Zugfolgezeit auf Abschnitten zwischen Zürich und Bern Neubaustrecke Rothrist – Mattstetten mit 200 km/h
Zürich – St. Gallen	<ul style="list-style-type: none"> Sehr dichter Betrieb Zürich – Winterthur Weiter östlich zunehmend entspanntere Situation

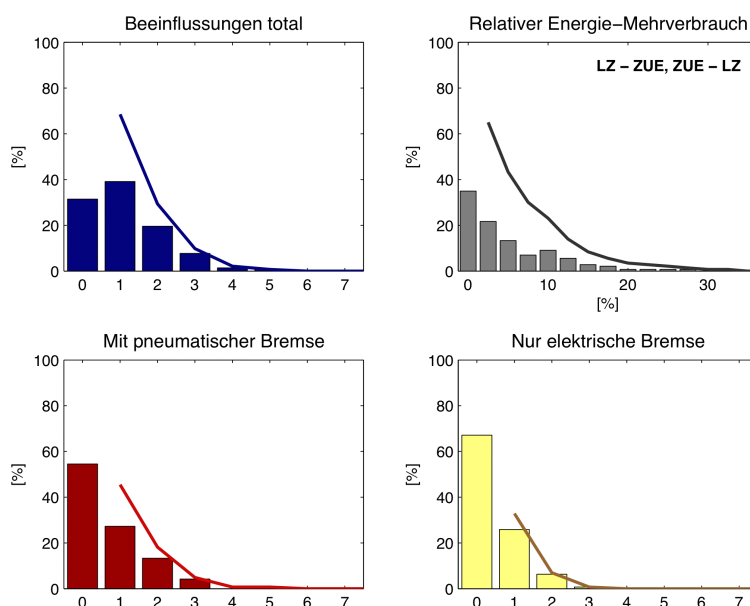
4.2 Resultate

Die Ergebnisse der Auswertung werden hier nach Strecken getrennt vorgestellt. Die Häufigkeitsverteilungen der Anzahl Beeinflussungen und des Energiemehrbedarfs sind in kleinen Grafiken dargestellt:

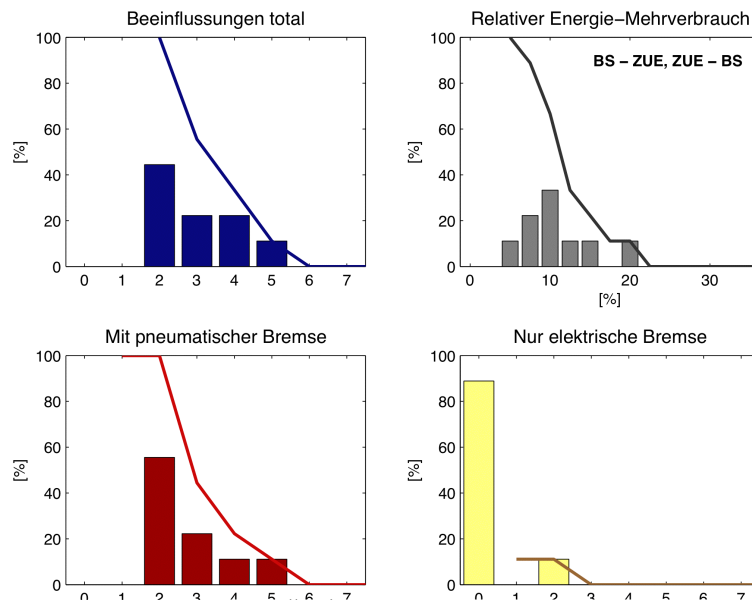
- Oben links und unten: Histogramm der relativen Anzahl Zugfahrten gegen die Anzahl Beeinflussungen. Die Balken sind wie folgt zu interpretieren (am Beispiel ZUE – LZ – ZUE): 40 % aller Zugfahrten weisen genau eine Beeinflussung auf (Balken). 68 % aller Fahrten weisen eine oder mehr Beeinflussungen auf, 29 % zwei oder mehr etc.
- Oben rechts: Histogramm der relativen Anzahl Zugfahrten gegen den relativen Energiemehrbedarf. Am Beispiel ZUE – LZ – ZUE: 35 % aller Züge haben keinen relevanten Energiemehrbedarf durch Beeinflussungen. 10 % aller Züge haben rund 10 % Mehrbedarf. 23 % aller Züge haben 10 % oder mehr Mehrbedarf aufgrund von Beeinflussungen.

Die Auswertung nach Strecken ergibt:

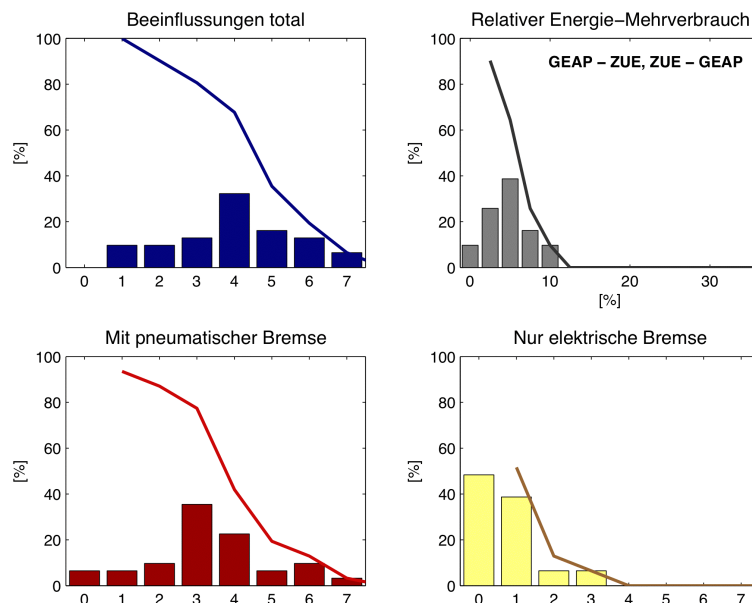
- Luzern – Zürich.** Nur ein Drittel aller Züge wird nicht beeinflusst. Da die Beeinflussungen oft an den gleichen Orten stattfinden, kennen die Lokführer die Situation und machen viele Geschwindigkeitsreduktionen auch dann ausschliesslich mit der elektrischen Bremse (was z.B. für die „berühmte“ Stelle beim Rotsee gilt). Einzelne Fahrten weisen gegenüber einer unbeeinflussten Fahrt einen Energiemehrbedarf von gut 30 % auf. Wie die Detailanalyse zeigt betrifft dies vor allem Bremsungen aus hoher Geschwindigkeit im Tunnel zwischen Nideldbad und Thalwil, vor der niveaugleichen Kreuzung mit der Stammstrecke Zürich Enge – Thalwil.



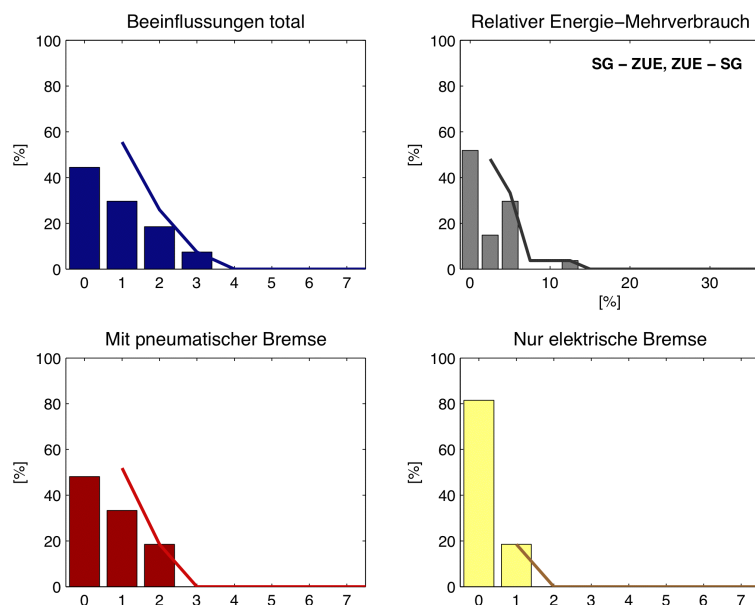
- **Zürich – Basel.** Jeder Zug weist mindestens zwei Beeinflussungen auf, die allermeisten mit Einsatz mechanischer Bremse. Allerdings herrschte bei einem Teil der Fahrten regnerisches Wetter, was generell zu vermehrten Gebrauch der mechanischen Bremse führt. Im Mittel werden durch die Beeinflussung ein Mehrverbrauch an Energie von 10.8 % ausgewiesen, einzelne Fahrten mit 5 Beeinflussungen bis zu 20 %. Die Werte sind aber nicht statistisch ausreichend abgesichert.



- **Zürich – Genève Aéroport.** Es kommt immer zu mindestens einer, im Extremfall bis zu sieben Beeinflussungen. Dies ist dem Durchfahren mehrerer stark belasteter Knoten und der langen Strecke zuzuschreiben. Beim grössten Teil wird die mechanische Bremse eingesetzt.



- **Zürich – St. Gallen.** Einige Fahrten sind gänzlich unbeeinflusst. Von der Anzahl Beeinflussungen her sehen die Ergebnisse ähnlich aus wie zwischen Zürich und Luzern, der spezifische Mehrbedarf an Energie ist aber nur halb so gross. Offensichtlich fehlen hier Stellen mit sehr kurzfristig erkennbaren Beeinflussungen, die zu Bremsungen aus hohen Geschwindigkeiten zwingen, weitgehend.



Die wichtigsten statistischen Kenngrössen der verschiedenen Strecken sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Strecke	Anzahl ausgewertete Fahrten	Anzahl Beeinflussungen pro 100 km	Energie-Mehrverbrauch [Wh/tkm]
ZUE – LZ – ZUE	143	1.9	0.98 (4.9 %)
ZUE – LZ	70	2.3	1.17 (5.8 %)
LZ – ZUE	73	1.6	0.80 (4.0 %)
ZUE – BS – ZUE	9	3.4	2.13 (10.4 %)
ZUE – BS	5	3.8	2.38 (11.8 %)
BS – ZUE	4	2.8	1.38 (8.7 %)
ZUE – GEAP – ZUE	31	1.5	0.98 (4.8 %)
ZUE – GEAP	15	1.6	0.92 (5.0 %)
GEAP – ZUE	16	1.4	0.87 (4.7 %)
ZUE – SG – ZUE	27	1.0	0.44 (2.5 %)
ZUE – SG	14	0.7	0.26 (1.5 %)
SG – ZUE	13	1.3	0.64 (3.6 %)

Von der Strecke Zürich – Chur liegen mit nur sechs definitiv zu wenige Fahrten vor. Die Ergebnisse werden deshalb als nicht statistisch signifikant angesehen und hier nicht dargestellt. Von der Strecke Zürich – Basel liegen ebenfalls zu wenige Daten vor; sie dürfen deshalb bei einer Hochrechnung nicht vollumfänglich mitberücksichtigt werden.

4.3 Folgerungen

Aus den Auswertungen der Messungen auf den Re 460 können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Das hier geschätzte Energiesparpotential beträgt je nach Strecke zwischen 2.5 und etwa 10 %.
- Das Sparpotential ist auf den verschiedenen Strecken ziemlich unterschiedlich. Ganz klar das grösste Potential haben dicht befahrene Strecken mit Folgekonflikten (z.B. wegen gemischtem Verkehr, Knotenzuläufe) sowie Einfädel- und Abkreuzungskonflikte.
- Dominierenden Einfluss auf den Energieverbrauch hat auch hier die Fahrweise des Lokführers. Der Einsatz der mechanischen Bremse verschlechtert die Energiebilanz entscheidend. Dass der grösste Teil der Beeinflussungen mit dem Gebrauch der mechanischen Bremse verbunden ist zeigt, dass

die Lokführer nicht vorausschauend in die entstehenden Konfliktpunkte einfahren sondern kurzfristig bei Warnung zeigenden Signalen bremsen müssen. In den meisten dieser Fälle würde bereits die kurzfristige Übermittlung der aktuellen Betriebslage an den Lokführer den Einsatz der mechanischen Bremse überflüssig machen und damit bereits den wichtigsten Beitrag zur Energieeinsparung bringen.

5 Hochrechnung der Lokführerbefragungen

In [5] sind die Auftretenswahrscheinlichkeiten von Zugsbeeinflussungen und die typischen Beeinflussungsgeschwindigkeiten für alle bekannten Konfliktpunkte in den Perimetern Luzern und Brugg angegeben. Die Werte wurden durch eine systematische Befragung von Lokführern ermittelt. Alle Angaben sind aufgeschlüsselt nach Zugnummerngruppen.

Interessant sind die Hochrechnung des durch die Beeinflussungen verursachten Energiemehrverbrauchs und der Quervergleich zu den oben aus den MicView-Daten gewonnenen Werten.

Methodisch wurde sehr ähnlich vorgegangen: Für jeden einzeln ausgewiesenen Konfliktpunkt wurde der durch die Beeinflussung verursachte Energie-Mehrverbrauch ermittelt. Dabei werden die entsprechenden Strecken- und Beeinflussungsgeschwindigkeiten und das Verlustmodell der aus dem Zugsbildungsplan ermittelten repräsentativen Zugkompositionen in die Energieverbrauchsrechnung eingesetzt. Da im Unterschied zu den MicView-Daten keinerlei Angaben über die Fahrweise und insbesondere den Einsatz der pneumatischen Bremse vorliegen, wurde für die Bremsung im Konfliktfall die mechanische Bremse mitbenutzt. Dies auf Grund der Annahme, dass viele der Beeinflussungen unvorhersehbar sind und mit entsprechend grossen Verzögerungswerten abgebremst werden muss. Das entspricht einer aus Sicht des Mehrverbrauchs tendenziell einer pessimistischen Annahme bzw. einer eher optimistischen Einschätzung des Einsparpotentials.

Anschliessend werden die beeinflussungsbedingten Mehrverbräuche jeder Zugnummernreihe kumuliert und auf die Fahrleistung des Zuges im betrachteten Perimeter bezogen. Die Fahrleistung wird als Produkt aus Zugmasse mit 25% Zuladung und der Bezugsstrecke in Kilometern als Tonnenkilometern quantifiziert. Der Energiemehrverbrauch wird dabei mit der Auftretenswahrscheinlichkeit des Konflikts gewichtet. Damit ergibt sich die in der zweitletzten Spalte der nachfolgenden Tabellen angegebene Differenzen des spezifischen Energieverbrauchs. Der prozentuale Mehrverbrauch in der letzten Spalte entsteht aus dem Verhältnis dieser Differenz zum mittleren spezifischen Energieverbrauch bei den SBB, nämlich 20 Wh/tkm für den Personen-Fernverkehr und 38 Wh/tkm für den Regional- und S-Bahnverkehr.

Zusammenfassend lassen sich folgende Erkenntnisse gewinnen:

- Im Perimeter Luzern liegt der geschätzte Mehrverbrauch zwischen 0.1 und 4.7 %. Den höchsten Wert erreichen die IC 2000 Züge mit den Zugnummern 23xx (IR Zürich – Luzern), welche in mehreren Konfliktpunkten beeinflusst werden und zum Teil stark abbremsen müssen. Da diese Züge eine recht hohe Masse aufweisen trägt die Verminderung derer Beeinflussungen überproportional zur Reduktion des Energieverbrauchs bei.
- Die relativ geringen Mehrverbrauchswerte der anderen Züge sind darauf zurückzuführen, dass sie nur an einzelnen Konfliktpunkten und / oder mit geringer Wahrscheinlichkeit beeinflusst werden. Zudem sind die zulässigen Streckengeschwindigkeiten relativ niedrig.
- Wie schon die Auswertung der MicView-Daten gezeigt hat sind die möglichen Einsparungen im Perimeter Baden / Brugg / Aarau mit den dicht befahrenen Strecken wesentlich höher als im Raum Luzern. Dies liegt einerseits an den recht häufig vorkommenden Beeinflussungen als auch an den höheren gefahrenen Geschwindigkeiten.
- Die Bandbreite des Mehrverbrauchs liegt zwischen knapp 2 und über 12 %, was auch gut korreliert mit den Werten aus den MicView-Daten.

Perimeter Luzern:

Zugnr	Ident	Bezugskm [km]	Beeinflussungen	deltaE Spez gew. [Wh/Btkm]	Mehrverbrauch [%]
21xx_1 - H	Re44II_8EC	34.688	[90,40 80,40]	0.28	1.4
21xx_1 - R	Re44II_8EC	34.688	[80,40]	0.11	0.6
21xx_2	Re44II_8EC	47.596	[125,40 80,40]	0.45	2.2
23xx - R	IC2000_9	28.418	[90,0 80,20 80,20]	0.94	4.7
24xx_2 - H	Re460_7EWIV	47.596	[125,40 80,40]	0.38	1.9
24xx_2 - R	Re460_7EWIV	47.596	[80,40]	0.03	0.1
25xx - H	Re460_7EWIV	47.596	[80,40]	0.32	1.6
25xx - R	Re460_7EWIV	47.596	[80,40 160,40]	0.36	1.8
29xx	Re44II_8EC	28.418	[80,40]	0.38	1.9
33xx - H	Re465_6EWIII	20.745	[80,20]	0.35	1.8
33xx - R	Re465_6EWIII	20.745	[80,20]	0.53	2.6
6xx - H	ICN	34.688	[90,40 80,40 125,40 80,40]	0.43	2.1
6xx - R	ICN	34.688	[80,40]	0.05	0.3
211xx	RABe523	28.418	[90,20 80,0]	0.54	1.4
213xx	RABe523	28.440	[80,0]	0.18	0.5
216xx - H	RPZ_3	20.745	[80,20 125,40]	1.16	3.1
218xx	RABe523	26.052	[80,20]	0.18	0.5
24xx_1	Re44II_4EWII	28.440	[80,40]	0.29	1.5
35xx - H	RABe523	47.596	[80,40]	0.16	0.4
35xx - R	RABe523	47.596	[80,40 80,40]	0.27	0.7
70xx	NPZ_4	37.226	[125,0]	1.72	4.5
70xx/73xx	NPZ_4	37.226	[90,30]	0.09	0.2

Perimeter Baden / Brugg / Aarau:

Zugnr	Ident	Bezugskm [km]	Beeinflussungen	deltaE Spez gew. [Wh/Btkm]	Mehrverbrauch [%]
5xx - H	ICN	30.0	[130,90 125,40 125,60 140,90 160,100]	1.08	5.4
5xx - R	ICN	30.0	[125,40 140,100 140,60 140,90]	2.32	11.6
7xx - H	IC2000_10	30.0	[125,40 140,90 160,100]	0.93	4.7
7xx - R	IC2000_10	30.0	[125,40 140,100 140,60 140,90]	1.94	9.7
8xx - H	IC2000_9	30.0	[125,40 140,100 160,100]	1.01	5.0
8xx - R	IC2000_9	30.0	[125,40 140,100 140,60 140,90]	2.25	11.2
15xx - H	ICN	30.0	[125,80 140,80]	0.53	2.7
15xx - R	ICN	30.0	[125,40 140,100 140,60 140,90]	2.39	11.9
17xx - H	Re460_11EC	30.0	[130,90 125,40 125,60 140,90 160,60]	1.60	8.0
17xx - R	Re460_11EC	30.0	[125,60 140,100 140,60 140,90]	2.48	12.4
19xx BN	Re460_7EWIV	37.9	[140,90]	0.28	1.4
19xx BS - H	Re460_7EWIV	35.8	[90,40 80,40]	0.35	1.8
19xx BS - R	Re460_7EWIV	35.8	[110,40 70,60 140,90]	0.38	1.9
20xx BN - H	Re460_7EWIV	30.0	[125,40 140,100 160,100]	1.46	7.3
20xx BN - R	Re460_7EWIV	30.0	[125,40 140,120 140,60 140,90]	1.52	7.6
20xx BS - H	Re460_7EWIV	35.8	[90,40 110,0 80,40]	0.65	3.2
20xx BS - R	Re460_7EWIV	35.8	[110,40 70,60 140,90]	0.48	2.4
21xx - H	Re460_7EWIV	30.0	[125,40 125,80 140,90 160,100]	0.98	4.9
21xx - R	Re460_7EWIV	30.0	[125,40 140,120 140,60 140,90]	1.85	9.3
36xx	NPZ_4	33.7	[125,40]	0.65	1.7
66xx	NPZ_4	21.9	[140,40]	0.38	1.0
67xx	NPZ_4	35.8	[110,40]	0.67	1.8
70xx - H	NPZ_4	12.6	[125,40 125,40]	5.15	13.5
70xx - R	NPZ_4	12.6	[125,40]	2.02	5.3

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. 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
- [3] M. Meyer, M. Lerjen, S. Menth, M. Halder: Das Energiesparprogramm der SBB. Schweizer Eisenbahn-Revue, Eisenbahn-Revue International und Eisenbahn Österreich 7/2008

- [4] 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
- [5] M. Lüthi: Verifizierung der Stromeinsparung durch ein effizientes Zugmanagement: Beeinflussungen von Zugsfahrten. Dokument IVT R-08-07, Version 1 vom 26.11.2009

Versionsinformation

--	21.11.2009	MM	Version zum Review
1	26.11.2009	ML	Schlussversion