



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

POTENTIALERMITTLUNG ENERGIEEFFI- ZIENZ TRAKTION BEI DEN SBB

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Markus Meyer, *emkamatik* GmbH

Rebbergstr. 20a, 5430 Wettingen

markus.meyer@emkamatik.com, www.emkamatik.com

Stefan Menth, *emkamatik* GmbH

Rebbergstr. 20a, 5430 Wettingen

stefan.menth@emkamatik.com, www.emkamatik.com

Markus Lerjen, *emkamatik* GmbH

Rebbergstr. 20a, 5430 Wettingen

markus.lerjen@emkamatik.com, www.emkamatik.com

Impressum

Datum: 13. Dezember 2007

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Bereichsleiter, felix.frey@bfe.admin.ch

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 101826 / 152247

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch / www.electricity-research.ch

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Resumé	4
Abstract	4
1. Zielsetzung	5
2. Methodik der Studie	5
2.1. Arbeitsablauf	5
2.2. Prioritäten	5
2.3. Randbedingungen	5
3. Zusammenfassung der Einzeldokumente	6
4. Hochrechnung auf die ganzen SBB	7
4.1. Technische Massnahmen auf Triebfahrzeugen	7
4.2. Massnahmen auf Reisezugwagen	7
4.3. Fahrweise und Zugsteuerung	7
4.4. Fahrplangestaltung	8
5. Wirtschaftliche Bewertung	8
5.1. Vorgehen	8
5.2. Ergebnisse	8
6. Empfehlungen	8
7. Kontaktpersonen	9
7.1. <i>emkamatik</i> GmbH	9
7.2. SBB Generalsekretariat	9
7.3. SBB Infrastruktur	10
7.4. SBB Personenverkehr	10
7.5. SBB Cargo	10
7.6. Weitere Bahnen	10
7.7. Triebfahrzeughersteller	10
8. Literatur	10
8.1. Fachberichte als Teil des vorliegenden Schlussberichts	10
8.2. Weitere Dokumente, erstellt im Rahmen dieser Studie	10
8.3. Frühere Arbeiten, auf die sich die Ergebnisse zum Teil stützen	10
8.4. Weitere Literatur	11

Zusammenfassung

Der 16.7-Hz-Bahnenergieverbrauch der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) wurde auf Sparmöglichkeiten untersucht. Zusammen mit Fachleuten der drei Divisionen Personenverkehr, Güterverkehr und Infrastruktur wurde der Istzustand besprochen und Vorschläge zur Verbrauchssenkung zur Diskussion gestellt. Anhand umfangreicher und detaillierter Simulationsrechnungen für einzelne Zugfahrten verschiedenster Zugarten und Fahrzeugtypen über reale Streckendaten der SBB konnte der Verbrauch hochgerechnet und mit den tatsächlichen Werten für das Gesamtnetz verglichen werden. Daraus kann das mögliche relative Einsparpotential beispielsweise durch energieoptimierte Fahrweise des Lokführers oder gezielte Zugsteuerung durch die Betriebsführung abgeschätzt werden. Es beträgt je zwischen 3 und 5 % des spezifischen Verbrauchs. Das Potential technischer Massnahmen an Triebfahrzeugen und Reisezugwagen, wenige Promille bis 3 % je Fahrzeugart, lässt sich ebenfalls aus den Modellrechnungen bestimmen und über den aktuellen Flotten- und Betriebsmix der SBB hochrechnen. Wichtig bei allen Massnahmen ist, dass die zu treffenden Massnahmen auf die Komplexität des äusserst dichten Bahnverkehrs im SBB-Netz Rücksicht nehmen und die Attraktivität der Bahn für die Kunden nicht verkleinern.

Resumé

Les possibilités d'une réduction de la consommation d'énergie électrique 16.7 Hz des Chemins de Fer Fédéraux Suisses (CFF) ont été examinées et discutées avec les experts des trois divisions Voyageurs, Fret et Infrastructure. La consommation totale des CFF a été approximée par des simulations numériques pour des trains et des lignes représentatives. Par une comparaison entre les résultats de ces simulations et la consommation mesurée pour le réseau total, il est possible de quantifier les réductions possibles, comme par exemple par une conduite optimale de la part des mécaniciens. Ce sont environ 3 à 5 % de la consommation spécifique que l'on pourrait économiser. De plus, les réductions par des mesures techniques – qui dépendent du type de véhicule - varient de quelques pour mille à 3 %. Cependant il est important que les mesures pour la réduction de la consommation d'énergie électrique soient compatibles avec le trafic extrêmement dense sur le réseau des CFF et ne réduisent pas l'attractivité des chemins de fer pour les passagers.

Abstract

Possibilities to reduce the consumption of 16.7-Hz traction energy of Swiss Federal Railways (SBB) have been investigated. Various proposals have been discussed together with experts of SBB's Passenger, Cargo and Infrastructure divisions. Based on numerical simulations for representative train runs, the total consumption of the SBB network could be calculated and compared with real values. The possible reduction e.g. by energy optimised driving could be derived from this comparison; it is between 3 and 5 % of the specific consumption both for the influence by train driver and by traffic control. Technical measures in traction units and passenger coaches lead to reductions of up to about 3 %, depending on the vehicle type. It is important that all measures take into account the extremely dense traffic on SBB's network and do not reduce the attractiveness for the customers.

1. Zielsetzung

Die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) sind das Einzelunternehmen mit dem grössten Stromverbrauch in der Schweiz. Allein für die Traktion und Zugheizung werden rund 2000 GWh/Jahr an elektrischer Energie verbraucht. Selbst kleine prozentuale Verbrauchsreduktionen bei den SBB können deshalb einen nennenswerten Beitrag an die Anstrengungen des Programms „Energie Schweiz“ leisten. Dabei geht es bei allen möglichen Einsparungen sowohl um einen direkten Beitrag zur Umwelt- und Energiepolitik der Schweiz als auch um einen indirekten Beitrag dadurch, der Bahn trotz Leistungs- und Komfortsteigerungen ihren Vorsprung gegenüber dem Privatverkehr zu erhalten. Nicht zuletzt ergeben sich auch sehr effiziente Massnahmen zur Kostenreduktion bei den SBB.

Im Rahmen des durchgeführten Projekts wurden die möglichen Einsparungen beim Verbrauch elektrischer Traktionsenergie der SBB systematisch ermittelt. Dabei wurden sowohl technische als auch betriebliche Massnahmen untersucht, in allen drei Divisionen Infrastruktur (I), Personenverkehr (P) und Güterverkehr (G) und den Schnittstellen zwischen diesen Divisionen. Dabei wurde denjenigen Massnahmen die grösste Priorität gegeben, welche gesamthaft die grössten Einsparungen bringen, sich leicht realisieren lassen und kurzfristig realisierbar sind.

2. Methodik der Studie

2.1. ARBEITSABLAUF

Bei der Arbeit an der Studie sind wir wie folgt vorgegangen:

- Spezifikation des Inhalts der Studie, Einteilung der möglichen Massnahmen in die verschiedenen hierarchischen Ebenen des Bahnbetriebs (Technik Fahrzeuge – Betrieb Fahrzeuge – Fahrweise – Zugsteuerung – Fahrplangestaltung – Energieversorgung), Kurzbeschreibung [2.1]
- Grosse Anzahl von Gesprächen mit Fachleuten der SBB (Divisionen I, P und G) sowie der Fahrzeugindustrie (Bombardier, Stadler Rail), Diskussion der vorgeschlagenen Massnahmen; s. auch Personenverzeichnis unten.
- Parallel dazu Erstellung bzw. Weiterentwicklung von Simulationsmodellen, welche in der Lage sind, Zugfahrten für konkrete Züge über konkrete Strecken der SBB realitätsnah abzubilden [1.7]
- Untersuchung der Massnahmen mit Hilfe der Simulationsmodelle (wo sinnvoll), Diskussion von Zwischenergebnissen mit den Fachleuten, Ermittlung des Sparpotentials für die betreffenden Massnahmen
- Einteilung der Ergebnisse in Massnahmen, die „auslösend“, „unterstützend“ oder „nicht realistisch“ sind (s. [1.1 – 1.6] und Zusammenfassung unten).

2.2. PRIORITÄTEN

Da das Feld möglicher Sparmassnahmen enorm gross ist, haben wir uns jederzeit von der Wirkung der einzelnen Massnahmen leiten lassen. Wichtig sind dabei:

- Energie ist eine integrale Grösse. Dies bedeutet, dass nicht exotische Massnahmen oder illustrative Einzelfälle den grössten Erfolg versprechen, sondern solche, bei denen grosse Zugmassen, hohe Geschwindigkeiten und vor allem häufige Wiederholung von Bedeutung sind. So erhalten Reisezüge und ihre geschickte Bremsung angesichts von zunehmend dichteren Taktintervallen, höheren Geschwindigkeiten und kürzeren Halteabständen eine höhere Priorität gegenüber Güterzügen, die aus tieferen Geschwindigkeiten ab und zu vor einem roten Signal halten müssen.
- Das Sparpotential technischer Massnahmen ist viel präziser einzuschätzen und zuverlässiger zu erschliessen als dasjenige, das von menschlichen Handlungen abhängig ist. Letzteres ist immer auch von der Psychologie der Beteiligten abhängig. Deshalb wurden technische Massnahmen auch detaillierter untersucht, insbesondere dort wo es sich durch Softwareänderungen erschliessen lässt.

Entsprechend erhielten im Verlauf der Studie die technischen Massnahmen an Triebfahrzeugen sowie die Betrachtung der optimalen Fahrweise (vorwiegend von Reisezügen) ein hohes Gewicht, während andere mit schwierig zu ermittelnden Daten und begrenzter Reichweite (z.B. Massnahmen an Diesellokomotiven) nicht weiter verfolgt wurden.

2.3. RANDBEDINGUNGEN

Als Randbedingungen für die Studie galten:

- Das Netz der SBB und die bestehenden Fahrzeuge sind gegeben, ebenso der grundsätzliche Fahrplan (Knotensystem, Umsteigebeziehungen etc.).
- Die Attraktivität des Bahnsystems gegenüber dem Individualverkehr soll durch Energiesparmassnahmen nicht vermindert werden. So einfache Massnahmen wie kürzere Züge mit weniger Sitz- und mehr Stehplätzen (höhere Auslastung) oder Verzicht auf Klimatisierung scheiden damit aus naheliegenden Gründen aus.
- Die Reihenfolge der Prioritäten bei der Zugführung (1. Sicherheit – 2. Pünktlichkeit – 3. Wirtschaftlichkeit) wird nicht geändert. Energiesparen durch unpünktlicheren Betrieb wäre eine Scheinlösung. Sie widerspricht entweder dem Ziel der hohen Attraktivität (z.B. durch verpasste Anschlüsse) oder verschiebt den Energieverbrauch nur von einem auf andere Züge.

3. Zusammenfassung der Einzeldokumente

Der Bericht zur Studie ist gegliedert in insgesamt acht Einzeldokumente. Das vorliegende Dokument enthält den zusammenfassenden Schlussbericht. In sieben weiteren Dokumenten sind folgend Ergebnisse enthalten:

- [1.1] Technische Massnahmen auf Triebfahrzeugen. *emkamatik*-Dokument 07-0204, V2 vom 13.12.2007
- Für jedes Streckentriebfahrzeug der SBB werden die möglichen technischen Massnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs genannt. Bei den realistischen Massnahmen wird eine Schätzung der erzielbaren Einsparungen und wenn möglich auch des Aufwands angegeben. Punkte, die unseres Wissens bei der Umsetzung beachtet werden müssen, sind ebenfalls genannt.
- [1.2] Betriebliche Massnahmen auf Triebfahrzeuge. *emkamatik*-Dokument 07-0205, V2 vom 13.12.2007
- Für eine Reihe realistischer Betriebsfälle im heutigen SBB-Netz werden, aufgeteilt in Personenfern-, -regional- und Güterverkehr, die Simulationsergebnisse für den Energiebedarf dargestellt. Daraus könnten diverse betriebliche Massnahmen bewertet werden, wie Verzicht auf Doppeltraktionen, Leerfahrten, reduzierte Höchstgeschwindigkeit etc. Es ist jedoch unrealistisch, dass im SBB-Netz solche Massnahmen nur zur Reduktion des Energieverbrauchs getroffen werden. Durch das tonnenkilometerabhängige Trassenpreissystem ist ausreichend Anreiz dafür vorhanden. Die dargestellten Simulationsergebnisse dienen im Rahmen der Studie jedoch auch als Referenz für die Untersuchung von einigen technischen Massnahmen auf Triebfahrzeugen sowie als Basis für die Abschätzung der Einsparmöglichkeiten durch energieoptimale Fahrweise.
- [1.3] Massnahmen auf Reisezugwagen. *emkamatik*-Dokument 07-0206, Version 2 vom 10.12.2007
- Die Absenkung der Innenraumtemperatur bei parkierten Reisezugwagen reduziert die Verlustwärme und damit den Heizenergieaufwand markant. Im Gegensatz zu modernen Fahrzeugreihen der SBB (ICN, IC 2000, DTZ, Flirt, etc.) sind EW I und II, EW IV, IC Bt Steuerwagen und EC-Wagen nicht mit Möglichkeiten zur Steuerung des Heizsparmodus ausgestattet. Thermische Simulationen zeigen ein erhebliches Einsparpotential, welches durch Nachrüstung der Fahrzeuge genutzt werden sollte. Entsprechendes gilt für die Klimatisierung parkierter Züge.
- [1.4] Fahrweise, Zugsteuerung, Fahrplangestaltung. *emkamatik*-Dokument 07-0207 vom 1.10.2007
- Neben den technischen und betrieblichen Massnahmen auf Fahrzeugen hängt der Energieverbrauch auch von der Fahrweise der einzelnen Züge ab. Es wird an Beispielen gezeigt, wie diese durch die Zugsteuerung der Betriebsleitzentralen und Fernsteuerzentren, durch die Fahrplangestaltung und durch die Umsetzung der Vorgaben durch den Lokomotivführer auf jedem einzelnen Zug beeinflusst werden kann.
- [1.5] Neubeschaffung von Triebfahrzeugen. *emkamatik*-Dokument 07-0208 vom 5.10.2007. Internes Papier, aufgrund laufender Beschaffungsvorhaben der SBB nicht veröffentlicht.
- Während der Arbeit an der Studie wurden Inputs in die Pflichtenhefte für neue Triebfahrzeuge gegeben (S-Bahn Zürich, elektrische Rangierlok, Zugkonzepte S-Bahn Lausanne und Doppelstock-Fernverkehrszüge). Diese sind nochmals zusammengefasst, und ergänzt durch einen Ausblick auf das nach dem EU-Projekt „Railenergy“ künftig angestrebte Vorgehen.
- [1.6] Energieversorgung. *emkamatik*-Dokument 07-0209 vom 24.9.2007 Version 1 vom 13.12.2007

Die Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie war kein zentrales Thema der Studie. Auch dort wird aber noch Sparpotential vermutet. Anhand einiger Beispiele wird aufgezeigt, durch welche Massnahmen Effekte in welcher Grössenordnung entstehen könnten. Im Gegensatz zu den fahrzeugseitigen Massnahmen oder der Fahrweise kann daraus jedoch kein Gesamtpotential für das SBB-Netz abgeleitet werden. Die Beispiele dienen vielmehr der Sensibilisierung und der Motivation, diese Themen künftig genauer anzusehen.

- [1.7] Beschreibung der Modelle und Rechentools. *emkamatik*-Dokument 07-0210, Version 1 vom 13.12.2007

Viele der in der Studie erarbeiteten Resultate stützen sich auf genaue Simulationen von Zugläufen mit Hilfe von Rechentools. Diese werden kurz beschrieben, um die Art der Erzeugung der betreffenden Ergebnisse verständlich zu machen, und auch im Hinblick auf ihre weitere Verwendung für künftige Studien oder als Unterstützung zur Umsetzung von Massnahmen.

4. Hochrechnung auf die ganzen SBB

Die Zusammenstellung der mit einiger Genauigkeit quantifizierbaren Einsparpotentiale aus allen Bereichen erlaubt eine grobe Hochrechnung auf den ganzen Traktionsenergiebedarf der SBB. Zur Erhaltung der Übersichtlichkeit sind nur die wirksamsten Massnahmen aufgeführt. Für detailliertere Angaben wird auf die Einzeldokumente verwiesen.

4.1. TECHNISCHE MASSNAHMEN AUF TRIEBFAHRZEUGEN

Re 460, ICN, Flirt, Turbo-GTW	Optimierte Antriebsregelung (Zwischenkreisspannung und Motorfluss)	7.7 GWh/Jahr
Re 460	Bremsleistungserhöhung	1.0 GWh/Jahr
Re 450, Re 460, NPZ	Abschaltung Ölpumpen in Parkstellung	9.3 GWh/Jahr
Ae 6/6	Bedarfsabhängige Ventilationssteuerung	3.0 GWh/Jahr
Re 4/4 II, Re 6/6	Automatische Abschaltung Ventilation im Stillstand	2.5 GWh/Jahr
Re 10/10	Digitaler Lastausgleich (Bremse)	2.0 GWh/Jahr

Tabelle 1: Technische Massnahmen auf Triebfahrzeugen

4.2. MASSNAHMEN AUF REISEZUGWAGEN

EW IV, EC, IC Bt	Heizsparbetrieb	4.8 GWh/Jahr
------------------	-----------------	--------------

Tabelle 2: Technische Massnahmen auf Reisezugwagen

4.3. FAHRWEISE UND ZUGSTEUERUNG

Die durch die Simulation für optimale Verhältnisse ermittelten Energieverbrauchswerte liegen dort, wo sowohl verlässliche Simulationsmodelle als auch statistisch relevante Messungen vorliegen, relativ nahe zusammen. Das Energiesparpotential für die Fahrweise und Zugsteuerung wird deshalb wie folgt eingeschätzt:

- Fahrweise (energieoptimale Fahrweise durch den Lokführer im Rahmen der ihm zugestandenen zeitlichen Toleranzen): rund 3 bis 5 %. Dieses Potential kann durch Schulung kurz- bis mittelfristig erschlossen werden.
- Betriebsführung (Orientierung der Lokführer über die aktuelle Betriebssituation und entsprechende Einschränkungen): etwa 1 bis 2 %. Dieses Potential kann vor allem mittelfristig erschlossen werden, da dazu die entsprechenden Kommunikationsmittel flächendeckend verfügbar sein müssen.
- Automatische Zugsteuerung (mit Hilfe von technischen Massnahmen, zur weitgehenden Verhinderung von konfliktbedingten Geschwindigkeitseinschränkungen und Halten): etwa 2 bis 5 %. Dieses Potential kann nur langfristig erschlossen werden, da es umfassende neue Betriebsleitsysteme bedingt, die vor allem aus Kapazitätsgründen nötig werden.

4.4 FAHRPLANGESTALTUNG

Netz, Fahrzeuge und Fahrplan der SBB sind gegeben. Es sind im besten Fall marginale Anpassungen im Hinblick auf eine Reduktion des Energieverbrauchs möglich, ohne die Gesamtattraktivität oder Leistungsfähigkeit des Systems zu schmälern. Wir weisen deshalb dafür kein Sparpotential aus.

5. Wirtschaftliche Bewertung

5.1. VORGEHEN

Für die wirtschaftliche Bewertung von Energiesparmassnahmen ist der reduzierte Verbrauch bei gegebenen Energiekosten im Vergleich zum Aufwand für die Umsetzung von Massnahmen massgebend.

Für den Energiepreis werden, nach Rücksprache mit SBB Infrastruktur Energie (I-EN), 0.095 CHF/kWh angesetzt. Dies entspricht dem gegenwärtigen, vom Bundesamt für Verkehr (BAV) bewilligten Satz, den I-EN an die Transportunternehmen weiterverrechnet. Dieser Wert wird sich nach Einschätzung von I-EN in den nächsten Jahren nicht markant ändern. Da alle untersuchten Massnahmen, sofern sie nicht die Bewertung der Neubeschaffung von Triebfahrzeugen oder Wagen betreffen, eher kurzfristiger Art sind, lassen wir diesen Energiepreis somit konstant und verzichten auch auf eine Verzinsungsrechnung. Die Bewertung von Neubeschaffungen liegt ausserhalb des Fokus dieser Studie.

Eine genaue Kostenschätzung für die Umsetzung von Sparmassnahmen ist ohne die Einholung von Offerten beteiligter SBB-Stellen oder Firmen nicht möglich. Wo dies möglich ist, haben wir Werte grob geschätzt, aufgrund eigener Einschätzung oder nach Rücksprache mit Fachleuten der SBB oder Industrie.

5.2. ERGEBNISSE

Für die verschiedenen Arten von Energiesparmassnahmen ergeben sich somit folgende, grob gerechnete Amortisationszeiten:

- Technische Massnahmen auf Fahrzeugen: 0.3 bis 1 Jahre (Software) bzw. 1 bis 3 Jahre (Umbaumassnahmen bei Hilfsbetrieben für Parkstellung oder Ventilation während der Fahrt)
- Jedes Prozent Traktionsenergie (also rund 20 GWh/Jahr), das eingespart werden kann, entspricht rund 1.9 Millionen CHF. Aufgeteilt auf etwa 4000 Lokführer steht somit für die Schulung eines Lokführers knapp 500 Franken zur Verfügung, um innerhalb eines Jahres ergebnisneutral zu sein. Gespart werden im ersten Jahr vielleicht zwei Prozent, sodass etwa ein Tag pro Lokführer für die Schulung eingesetzt werden kann, wenn eine Amortisationszeit von einem Jahr angestrebt ist. Mehr als diese Grössenordnung lässt sich mit sinnvoller Genauigkeit nicht ermitteln. Wichtig ist jedoch, dass die Einsparungen (bei geeigneter Schulung und Motivation) längerfristig anhalten, und die Schulungskosten mit der Zeit sinken.
- Für technische Massnahmen seitens der Betriebsführung (z.B. zur Verhinderung von Signalhalten) kann alleine aufgrund der Energie keine Eigenwirtschaftlichkeit ausgewiesen werden. Separate Leitsysteme zur Senkung des Energieverbrauchs lassen sich aus der eingesparten Traktionsenergie kaum finanzieren. Hier ist umgekehrt vorzugehen: bei Betriebsleit- und Kommunikationssystemen, die ohnehin ergänzt oder geschaffen werden, ist dem Energieaspekt Beachtung zu schenken, so dass sie diesem nicht zuwiderlaufen, sofern kein zwingender Zielkonflikt vorliegt.

6. Empfehlungen

Als Ergebnis dieser Studie empfehlen wir den SBB das folgende Vorgehen:

Umsetzung technischer Massnahmen auf Triebfahrzeugen:

- Die Optimierung der Reglerparameter (Zwischenkreisspannung, Motorfluss) auf den Re 460, zusammen mit Bombardier Transportation
- Die Optimierung der Reglerparameter (Zwischenkreisspannung, Motorfluss) auf den FLIRT und GTW, zusammen mit Stadler Rail und ABB
- Die Optimierung des Motorflusses im unteren Geschwindigkeitsbereich beim ICN zusammen mit Bombardier Transportation
- Kontaktaufnahme zu Bombardier Transportation, um die Möglichkeit von Reglerparameter-Optimierungen auf den Re 482 und Re 484 abzuklären

- Die Realisierung einer geeigneten bedarfsabhängigen Ventilationssteuerung für die Ae 6/6 sowie Detailabklärungen zur Ventilatorabschaltung im Stillstand bei den Re 10/10
- Die Abschaltung von nicht benötigten Ölpumpen in Parkstellung bei den NPZ, Re 450 und Re 460 durch entsprechende hard- und softwareseitige Massnahmen
- Die Unterstützung und Begleitung der Regleroptimierungen insbesondere durch eine präzise messtechnische Validierung um sicherzustellen, dass wirklich das Optimum erreicht wird
- Die Bereitstellung von Energieverbrauchs-Information auf den Displays der moderneren Triebfahrzeuge, so dass diese vom Lokführer zu seiner eigenen Motivation einfach abgerufen werden kann

Betrieb der Triebfahrzeuge:

- Die Optimierung der „Gefässgrössen“ und Reduktion von Leerläufen im Rahmen der ohnehin stattfindenden Anstrengungen in diese Richtung

Umsetzung technischer Massnahmen auf Reisezugwagen:

- Heizsparmodes auf den Fahrzeugen EW IV, EC und IC Bt sowie Abklärung der Wirtschaftlichkeit für EW I und II

Fahrweise durch den Lokführer:

- Eine pünktliche und energieoptimale Fahrweise, insbesondere durch eine konsequente Bedienung der Bremsen
- Aufbau eines Schulungsprogramms, das diese Fahrweise unterstützt, fahrzeugspezifische Anweisungen dazu gibt und den Handlungsspielraum des Lokführers gegenüber demjenigen der Betriebsführung genau abgrenzt. Eine allfällige Schulung ist mit der Betriebsführung abzustimmen.

Zugsteuerung und Fahrplangestaltung:

- Unterstützung aller Kommunikations-Massnahmen, welche es erlauben, dass die Betriebsführung die Lokführer über die aktuelle Betriebssituation und insbesondere über ihren eigenen Zug orientiert
- Berücksichtigung des Energieaspekts bei den laufenden oder beantragten Projekten wie LEA 2, Co-produktion, PULS 90, Pünktliches Fahren im Kernnetz (PIK) etc. Diese Projekte stehen nicht im Widerspruch zu einem energieeffizienten Bahnbetrieb; es ist also lediglich wichtig, dass dieser begleitend zu diesen Projekten den entsprechenden Stellenwert einnimmt und entsprechender Handlungsspielraum, sofern vorhanden, erkannt und sinnvoll genutzt wird

Neubeschaffung von Triebfahrzeugen:

- Vorgehen wie bei der Ausschreibung für die neuen Doppelstock-S-Bahnzüge angewandt, künftig nach dem sich abzeichnenden Entwurf eines europäisch harmonisierten Vorgehens (EU-Projekt „Railenergy“)
- Erkennen spezieller Zielkonflikte, z.B. beim Transformatorgewicht bei Triebzügen. Eine leicht erhöhte Achslast sollte akzeptiert werden, sofern diese für Energiesparmassnahmen (z.B. grösserer Transformator mit deutlich weniger Verlusten) benötigt wird und das Fahrzeug gleichzeitig gleis-schonende Drehgestelle aufweist.

Energieerzeugung und Verteilung:

- Genauere Analyse der Verhältnisse im Energieversorgungsnetz der SBB im Hinblick auf mögliche Optimierungen, unter Berücksichtigung von Studien der ÖBB, die vor einigen Jahren mit dem gleichen Ziel durchgeführt wurden.

7. Kontaktpersonen

7.1. *emkamatik* GmbH

Verfasser der Studie. Adresse: Rebbergstrasse 20a, 5430 Wettingen.

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

7.2. SBB GENERALSEKRETARIAT

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

[x] **Roger Müller**, Tel 0512 20 51 18. roger.ibmue.mueller@sbb.ch

7.3. SBB INFRASTRUKTUR

[x] **Ulrich Morf**, Tel 0512 20 43 15, ulrich.mf.morf@sbb.ch

[x] **Felix Laube**, Tel 0512 20 57 89. felix.laube@sbb.ch

[x] **Jean-Pierre Pfander**, Tel 0512 20 25 09, jean-pierre.pf.pfander@sbb.ch

[x] **Martin Aeberhard**, Tel 0512 20 46 33, martin.aeberhard@sbb.ch

[x] **Michael Schürch**, Tel 0512 20 91 91, michael.schuerch@sbb.ch

7.4. SBB PERSONENVERKEHR

[x] **Jürg Briner**, Tel 0512 20 47 58. juerg.briner@sbb.ch

[x] **Konrad Ehrbar**, Tel 0512 24 84 29, konrad.ehrbar@sbb.ch

[x] **Walter Elmer**, Tel 0512 28 05 29, walter.elmer@sbb.ch

[x] **Kurt Gerber**, Tel 0512 20 36 40. kurt.kg.gerber@sbb.ch

[x] **Ralf Hofer**, Tel 0512 29 51 93, ralf.rh.hofer@sbb.ch

[x] **Herbert Kessler**, Tel 0512 20 47 79, herbert.kessler@sbb.ch

[x] **Thomas Oettli**, Tel 0512 29 51 94, thomas.to.oettli@sbb.ch

[x] **Nadine Tubandt**, Tel 0512 20 22 37, nadine.tubandt@sbb.ch

[x] **Eric Tzaud**, Tel 0512 20 69 93, eric.tz.tzaud@sbb.ch

7.5. SBB CARGO

[x] **Henk Christiaans**, 051 229 03 26, henk.christiaans@sbbcargo.com

[x] **Hansruedi Signer**, 0512 29 08 91, hansruedi.signer@sbbcargo.com

[x] **Michael Schatzmann**, 0512 29 02 97, michael.schatzmann@sbbcargo.com

7.6. WEITERE BAHNEN

[x] **Matthias Müri**, Tel 081 288 22 38. m.mueri@rhb.ch

7.7. TRIEBFAHRZEUGHERSTELLER

[x] **Jürg Schöning**, Tel 071 626 87 36. juerg.schoening@stadlerrail.ch

[x] **Christian Gerster**, Tel 056 299 26 25, christian.gerster@ch.transport.bombardier.com

8. Literatur

8.1. FACHBERICHTE ALS TEIL DES VORLIEGENDEN SCHLUSSBERICHTS

[1.1 – 1.7] siehe oben

8.2. WEITERE DOKUMENTE, ERSTELLT IM RAHMEN DIESER STUDIE

[2.1] M. Meyer, St. Menth: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB: Arbeitsplan. *emkamatik*-Dokument 06-0140, Version 2 vom 21.8.2006

[2.2] St. Menth, M. Meyer: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB. Bestandesaufnahme und Massnahmenübersicht. *emkamatik*-Dokument 06-0149, Version 2 vom 14.6.2007

[2.3] M. Meyer: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB. Fragebogen zu technischen Massnahmen auf Triebfahrzeugen. *emkamatik*-Dokument 07-0193 vom 25.6.2007

8.3. FRÜHERE ARBEITEN, AUF DIE SICH DIE ERGEBNISSE ZUM TEIL STÜTZEN

[3.1] M. Meyer, M. Aeberhard: Vom Gratisstrom zur Energiesparlokomotive – Energieverbrauch bei elektrischen Bahnen. Schweizer Eisenbahn-Revue und Eisenbahn-Revue International 1-2/1997, Seiten 28 – 39

[3.2] M. Meyer, B. Schwab, R. Bänziger: Energiesparen dank verstärkter Ausnutzung der Rekupe-
rationsbremse der Re 6/6 und Re 4/4 II der SBB. Schweizer Eisenbahn-Revue 6/1996

[3.3] R. Bänziger, P. Giannini, M. Meyer: Hochrentable Nachrüstung einer erwärmungsabhängigen
sensorlosen Lüftersteuerung bei elektrischen Triebfahrzeugen. Elektrische Bahnen 12/1995

- [3.4] 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
- [3.5] M. Meyer, R. Prem, R. Franke: Der „Driving Style Manager“ für pünktlichen und energiespar-samen Bahnbetrieb. Schweizer Eisenbahn-Revue, Eisenbahn-Revue International und Eisenbahn Österreich 3/2002
- [3.6] M. Meyer: SBB Personenverkehr: Energieverbrauch Re 420 im Fernverkehr. *emkamatik*-Dokument 04-0019, Version 1 vom 8.4.2004
- [3.7] S. Menth: SBB Personenverkehr: Energieverbrauch SBB Regionalverkehr. *emkamatik*-Dokument 04-0041, Version 1.2 vom 24.9.2004

8.4. WEITERE LITERATUR

- [4.1] UIC: EVENT – Summary of the Final Report. UIC-Dokument, März 2003
- [4.2] UIC: Energy efficiency technologies for railways. www.railway-energy.org

Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB:

Technische Massnahmen auf Triebfahrzeugen

Informationen zu diesem Dokument

Das vorliegende Dokument ist Teil des Schlussberichts zu der von *emkamatik* GmbH durchgeführten Studie „Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB“ [1]. Es definiert die technischen Massnahmen auf Triebfahrzeugen der SBB, die zur Reduktion des Energiebedarfs getroffen werden können.

1 Methodik

Technische Massnahmen auf Triebfahrzeugen (und Wagen) stellen die wirkungsvollste Art der Energieverbrauchsreduktion dar. Einmal umgesetzt, sind sie vom Bedienpersonal oder von der Verkehrslage nicht mehr abhängig. Ausserdem lässt sich ihre Wirtschaftlichkeit relativ klar nachweisen oder verwerfen. Derartige Massnahmen erhielten in der Studie deshalb einen hohen Stellenwert.

Zur Ermittlung des Sparpotentials gingen wir wie folgt vor:

- Auflistung der möglichen Massnahmen, vorwiegend aus eigener Engineering-Erfahrung, sowie Quervergleich mit Literaturstellen (EVENT-Datenbank)
- Erstellung eines Fragebogens zu den auf modernen Triebfahrzeugen bereits realisierten Massnahmen, sofern die betreffenden Fahrzeuge noch in der Systemverantwortung eines Herstellers sind [3]. Vergleich der eingegangenen Antworten mit unserer eigenen Einschätzung.
- Untersuchung der Einzelmassnahmen anhand von einfachen Hochrechnungen (z.B. für Parkstellung) bzw. mit detaillierten Simulationsmodellen (Regleroptimierung)
- Vorzeitige Elimination von Massnahmen, die wenig oder keine Chance auf Realisierung haben, auch wenn sie im Arbeitsplan genannt waren (z.B. Umrüstung von Re 450 auf neue Traktionsstromrichter)
- Hochrechnung der möglichen Energieeinsparungen entweder direkt, oder aufgrund der aus Zuglaufsimulationen ermittelten prozentualen Einsparung, bezogen auf den von SBB angegebenen Gesamtverbrauch einer Flotte.

2 Mögliche Massnahmen

Die möglichen Massnahmen auf Triebfahrzeugen umfassen:

- Optimierte drehzahlvariable Hilfsbetriebssteuerung. Auf Stufenschalter-Triebfahrzeugen mehrheitlich nachgerüstet (Re 4/4 II, III und Re 6/6), auf allen anderen seit jeher vorhanden. Separate Untersuchungen (u.a. im Rahmen eines Inputs für das „Global model“ im EU-Projekt Railenergy) haben gezeigt, dass es auf die genaue Lage der Umschaltzeitpunkte zwischen den Drehzahlen nicht ankommt, sofern sie einigermaßen richtig gewählt sind (Effekt gegenläufiger Verluste durch die Motorerwärmung). Für Umrichtertriebfahrzeuge und den NPZ wurde die drehzahlvariable Hilfsbetriebssteuerung deshalb nicht weiter analysiert.
- Hilfsbetriebsleistung in Parkstellung. Angesichts der relativ langen Zeit, in der sich die Fahrzeuge in Parkstellung befinden (typischerweise bis 8 Stunden pro Tag), trägt der Verbrauch in Parkstellung erheblich zum Gesamtkonsum bei. Jeder nicht zwingend benötigte Verbraucher soll abgestellt werden.
- Optimierung der Reglersollwerte in Umrichtertriebfahrzeugen. Vor allem bei der Wahl der Zwischenkreisspannung und des Motorflusses in Funktion des Arbeitspunkts (Geschwindigkeit, Zugkraft) besteht ein gewisser Spielraum. Die einfachste Art, diese Parameter zu setzen, ist oft nicht energieoptimal. Viele der Triebfahrzeuge haben keine wirklich idealen Kennlinien programmiert, da der Aufwand für die rechnerische Optimierung hoch ist und dem Hersteller nicht separat entschädigt wird.

Da die Änderung der Sollwerte aber ausschliesslich durch Software geschieht, sind die Kosten einer Nachrüstung über eine grössere Flotte trotzdem günstig, insbesondere wenn die Änderung mit einem ohnehin anstehenden Software-Releasewechsel geschehen kann.

- Erhöhung der elektrischen Bremsleistung. Aufgrund des umgekehrten Energieflusses beim Bremsen ist der Spitzenstrom im Motorwechselrichter einer Umrichterlokomotive beim Bremsen bei gleicher Leistung am Rad kleiner als beim Fahren. Die maximale Bremsleistung (nicht aber die Bremskraft!) könnte deshalb erhöht werden. Wir gehen pauschal von rund 5 % aus, abgesichert durch Rechnungen für einzelne Betriebspunkte in der Re 460 und im FLIRT. Es ist zu beachten, dass dadurch nur im statistischen Mittel über viele Fahrten eine höhere Energierückspeisung und damit ein reduzierter Verbrauch erreicht werden kann.
- Anzeige des Energieverbrauchs für den Lokführer. Kann die aufgenommene Energie vom Lokführer abgerufen werden, so ist dies eine zusätzliche Motivation, energiesparend zu fahren und die eigenen Ergebnisse laufend zu verbessern oder gut zu behalten. Im Vordergrund steht dabei eine Anzeige auf dem ohnehin bestehenden Diagnosedisplay moderner Triebfahrzeuge, z.B. im Stillstand. Während der Fahrt ist eine Anzeige eher unerwünscht, um den Lokführer nicht von seiner Hauptaufgabe abzulenken. Die Anzeige selbst soll rücksetzbar sein (z.B. am Beginn einer Fahrt), muss aber nicht den Genauigkeitsanforderungen genügen, wie sie für eine Energieabrechnung nötig wäre. Deshalb kann sie oft auf einfache Weise aus der Traktionsleittechnik aufbereitet werden.

Grundsätzlich haben sich alle kontaktierten Triebfahrzeughersteller interessiert für detailliertere Untersuchungen und weitere Gespräche zu vielversprechenden Massnahmen gezeigt.

3 Massnahmen auf Lokomotiven

3.1 Ae 6/6

Die Ae 6/6 bewältigen immer noch einen nennenswerten Teil des Binnengüterverkehrs in der Schweiz und sollen noch rund 10 Jahre in Betrieb bleiben.

Bisher verfügen die Ae 6/6 über keine bedarfsabhängige Ventilationssteuerung. Während der Fahrt laufen die Ventilatoren immer auf Stufe „stark“, wie seinerzeit vor der Optimierung bei den Re 6/6 und Re 4/4 II und III. Eine Nachrüstung ist für diejenigen Maschinen, die noch mehrere Jahre in Betrieb bleiben, wirtschaftlich. Es ist zu bestimmen, ob eine einfache, vom Lokführer nach Bedienungsanweisung durchgeführte Unterdrückung der Stufe „stark“ genügt, oder ob ebenfalls eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) eingebaut werden soll.

Eine grobe Abschätzung von Aufwand und Ertrag ergibt:

- Leistungsunterschied „stark“ – „schwach“ (geschätzt): 40 kW
- 80'000 km/Jahr pro Lok, mittlere Geschwindigkeit 60 km/h, gibt ca. 1300 Betriebsstunden pro Jahr
- davon ca. 80 % neu mit Ventilation „schwach“ statt „stark“
- ca. 60 (von ursprünglich 120) Loks
- Einsparung von rund 5000 CHF/Jahr pro Lok
- Einbaukosten pro Lok rund 2 kCHF (nur neue Bedienung) oder 10 kCHF (SPS)

Ergebnis:

Ae 6/6	Bedarfsabhängige Ventilationssteuerung		3 GWh/Jahr
---------------	--	--	------------

3.2 Re 4/4 II und Re 6/6

Beide Typen verfügen bereits über eine nachgerüstete bedarfsabhängige Ventilationssteuerung. Im Stillstand der Lok kann die Ventilation durch den Lokführer jedoch nur auf der besetzten Lok abgestellt werden. Auf einer vielfach- oder ferngesteuerten Lok läuft sie auf Stufe „schwach“ weiter. Diesem Aspekt wurde damals bei der Entwicklung der optimierten Steuerung keine Beachtung geschenkt.

Es ist zu überprüfen, ob entweder eine ferngesteuerte Abschaltung oder überhaupt eine automatische Abschaltung im Stillstand realisiert werden kann. Dies wäre dann sinnvoll, wenn die eingebaute SPS noch über einen freien Ausgang verfügt. Entsprechende Detailabklärungen haben wir nicht vorgenommen. Die mögliche Energieeinsparung kann jedoch wie folgt abgeschätzt werden:

- Leistung auf Stufe „schwach“ 19 kW (Re 4/4 II und III) bzw. 39 kW (Re 6/6)

- Betroffene Anzahl Lokomotiven: rund 65 (als Re 10/10) sowie je zwei mal 20 in Vielfachsteuerung von Re 4/4 II und 20 in Pendelzügen mit Re 4/4 II
- Einsparung jeweils auf einer von beiden Loks während 4 Stunden/Tag bzw. die Hälfte der Zeit auf einem Pendelzug während 2 Stunden/Tag an 5 Tagen pro Woche
- Ausrüstungskosten (sofern mit bestehender SPS realisierbar) rund 2 kCHF/Lok

Ergebnis:

Re 4/4 II, Re 6/6	Aut. Abschaltung Ventilation im Stillstand		2.5 GWh/Jahr
--------------------------	--	--	--------------

3.3 Re 10/10

Als „Re 10/10“ werden je eine Re 4/4 II oder III und eine Re 6/6 bezeichnet, die gemeinsam in Vielfachsteuerung verkehren. SBB Cargo befördert so die meisten Transitgüterzüge, fast alle zwischen Erstfeld und Bellinzona, sehr viele bereits ab Basel bzw. bis Chiasso oder Luino. In dieser gemischten Vielfachsteuerung lässt sich die elektrische Bremse der Loks nicht ideal ausnützen, da die Bremsschaltungen beider Loks nicht übereinstimmen und auch dem Lokführer die Bremsströme (bedingt durch Phasendifferenzen) nicht richtig angezeigt werden.

Untersuchungen und die Ausrüstung eines Paares von Lokomotiven durch die ETH Zürich hatten in den Jahren 1995 / 96 gezeigt, dass sich diese Nachteile durch einen digitalen Lastausgleich beheben lassen. Damals wurden 50'000 kWh/Jahr und Re 10/10 als realisierbare Einsparung angegeben [4]. Ebenfalls im Jahr 1996 wurden die zulässigen elektrischen Bremskräfte der Loks jedoch wieder herabgesetzt, so dass sich heute vermutlich kleinere Einsparungen ergeben. Auch ist das Ergebnis stark abhängig von der durchschnittlichen Last der Güterzüge und von ihrer Zusammensetzung (gemischte Züge oder Blockzüge). Wir setzen deshalb, ohne nähere aktualisierte Untersuchungen, folgende Einsparungen an:

- 30'000 kWh/Jahr und Re 10/10
- 65 Loks im Betrieb

Ergebnis:

Re 10/10	Digitaler Lastausgleich (Bremse)		2 GWh/Jahr
-----------------	----------------------------------	--	------------

3.4 Re 450

Die 115 Lokomotiven vom Type Re 450 bewältigen heute und auch in Zukunft einen grossen Anteil des Verkehrs der Zürcher S-Bahn. Sie gehören zur ältesten Generation der Strecken-Umrichterlokomotiven der SBB (Entwicklungszeit ab ca. 1985) und können wegen ihrer alten Rechner-technik neuere Regelverfahren nicht anwenden. Deshalb kommt eine Optimierung der Reglersollwerte nicht in Frage, obwohl die Motorstromrichter auf die einfachste Art geregelt werden (konstanter Motorfluss, ausser in der Feldschwächung, und konstante Zwischenkreisspannung für alle Arbeitspunkte).

In der Parkstellung laufen jedoch alle Ölpumpen dauernd, obwohl dies weder für die Stromrichter (ausser Betrieb) noch für den Transformator (praktisch keine Erwärmung) notwendig wäre. Durch den Einbau zusätzlicher Schütze für die Ölpumpen könnten diese in der Parkstellung abgetrennt werden. Dieser Umbau ist nach Aussagen des IW Yverdon realistisch. Es ergibt sich folgende Hochrechnung:

- Pumpenleistung 6 kW (je zwei mal 1.5 kW für Trafo- und Stromrichterölpumpen)
- Parkstellungszeit rund 12.5 h pro Tag, gemittelt über das ganze Jahr (Angaben SBB)
- Umbaukosten in der Grössenordnung von 5000 CHF/Lok
- Einsparung in der Grössenordnung 4600 CHF/Jahr pro Lok

Ergebnis:

Re 450	Abschaltung Ölpumpen in Parkstellung		2.8 GWh/Jahr
---------------	--------------------------------------	--	--------------

3.5 Re 460

Die Abschaltung der Ölpumpen in der Parkstellung durch den Einbau zusätzlicher Schützen ist auch auf die 119 Loks vom Typ Re 460 anwendbar. Allerdings sollte eine der beiden Trafoölpumpen weiterlaufen, da im Transformator bei der Konditionierung langer Reisezüge in der Zugsammelschienen-Wicklung ein erheblicher Strom fliessen kann. Die Hochrechnung ergibt dann:

- Pumpenleistung insgesamt 16.5 kW (drei Pumpen zu je 5.5 kW)

- Parkstellungszeit rund 9 h pro Tag, gemittelt über das ganze Jahr (Angaben SBB)
- Umbaukosten in der Grössenordnung von 5000 CHF/Lok
- Einsparung in der Größenordnung 4600 CHF/Jahr pro Lok

Ergebnis:

Re 460	Abschaltung Ölpumpen in Parkstellung		5.8 GWh/Jahr
---------------	--------------------------------------	--	--------------

Zusätzlich besteht auf den Re 460 Potential bei der Optimierung der Reglersollwerte für den Umrichter. Eine vermutlich relativ einfach zu realisierende Massnahme ist die arbeitspunktabhängige Optimierung der Zwischenkreisspannung. Diese ist heute nur geschwindigkeits- und fahrleitungsspannungsabhängig. Eine Abhängigkeit von der Leistung und Zugkraft, die unabhängig von der Geschwindigkeit die Zwischenkreisspannung bei Teillast reduziert, ist bisher nicht realisiert. Diese liesse sich wahrscheinlich im Stromrichterleitgerät (SLG) in FUPLA realisieren, ohne die komplexere Programmierung (Assembler) im Antriebsleitgerät (ALG) ändern zu müssen.

Die möglichen Energieeinsparungen durch die Regloptimierung wurden mit Zuglaufsimulationen ermittelt [5]. Daraus ergibt sich eine prozentuale Einsparung, die auf die ganze Flotte hochgerechnet werden kann. Für die „Optimierung Stufe 1“ (nur ZK-Spannung) ergibt sich, konservativ, etwa 1.2 %. Für die „Stufe 2“ (zusätzlich Motorfluss) gibt es noch keine Modellrechnungen. Wir setzen als Schätzung etwa 0.5 % an. Somit resultiert:

- Gesamtverbrauch Flotte Re 460 nach Angaben SBB: 370 GWh/Jahr
- Für beide Massnahmen zusammen resultiert eine Einsparung von ca. 5000 CHF/Jahr pro Lok
- Kosten: um den notwendigen Offerten durch die Fahrzeugindustrie für Erstellung und Absicherung der Softwareänderung nicht vorzugreifen, wird keine Kostenschätzung aufgeführt.

Ergebnis:

Re 460	Optimierte Zwischenkreisspannung	1.2 %	4.5 GWh/Jahr
Re 460	Zusätzlich optimierter Motorfluss	0.5 %	1.8 GWh/Jahr

Es wird ein separates Spezifikations-Dokument für die Umsetzung der optimierten Kennlinien erstellt.

Zudem soll überprüft werden, ob auf den Re 460 aus Sicht der Stromrichter die elektrische Bremsleistung tatsächlich erhöht werden kann, von max. 6100 kW auf 6400 kW am Rad. Dadurch ergibt sich im Mittel über ein Jahr eine weitere Reduktion des Energieverbrauchs. Diese ist nur wirksam, wenn der Zug auch mit den mechanischen Bremsen gebremst wird (also nur bei ungeeigneter Fahrweise oder verspäteten Zügen), und bei trockenen Schienen. Die Kosten für die Umprogrammierung sind vernachlässigbar, wenn sie mit einem normalen Releasewechsel geschehen. Die Einsparungen betragen in Einzelfällen bis 4 % (nachgerechnet mit Zuglaufsimulationen), über die ganze Flotte und ein Jahr vermutlich weniger als 0.5 %. Sie sind aber praktisch „kostenlos“ erzielbar. Wir setzen sie konservativ wie folgt an:

- Kosten: um den notwendigen Offerten durch die Fahrzeugindustrie für Erstellung und Absicherung der Softwareänderung nicht vorzugreifen, wird keine Kostenschätzung aufgeführt. Es kann jedoch angenommen werden, dass die Mehrkosten gegenüber den oben definierten Softwaremassnahmen marginal ist, bzw. eine Bremsleistungserhöhung bei gleichzeitiger Spezifikation darin inbegriffen ist.

Ergebnis:

Re 460	Bremsleistungserhöhung	0.25 %	1 GWh/Jahr
---------------	------------------------	--------	------------

3.6 Re 482

Die vorliegenden technischen Angaben lassen nur ein geringes Potential vermuten. Es wurde deshalb keine detaillierte Potentialermittlung durchgeführt. Wir empfehlen, die Potentialermittlung nachzuholen, allerdings nicht mit hoher Priorität.

3.7 Re 474

Wegen der kleinen Stückzahl und dem Einsatz vorwiegend im Ausland wurde diese Flotte nicht betrachtet.

3.8 Re 484

Die vorliegenden technischen Angaben lassen nur ein geringes Potential vermuten. Es wurde deshalb keine detaillierte Potentialermittlung durchgeführt. Wir empfehlen, die Potentialermittlung nachzuholen, allerdings nicht mit hoher Priorität.

4 Massnahmen auf Triebwagen und Triebzügen

4.1 RABDe 510 „Mirage“

Die Triebzüge „Mirage“ mit Allachsantrieb stehen noch im Zürcher S-Bahnnetz im Einsatz. Anlässlich der Totalrevision in den 1990er-Jahren wurde eine teilweise „Optimierung“ der Ventilationssteuerung eingebaut. Nach unserer Kenntnis handelt es sich um eine Reduktion der Ventilationsleistung im Stillstand. Während der Fahrt, bei schwacher Auslastung der Motoren, verbleibt ein Restpotential. Da diese Triebzüge aber eine beschränkte Restlebensdauer haben, kann auf eine weitere Optimierung aber verzichtet werden.

4.2 RBe 540 „RBe“

Die Triebwagen RBe 540 weisen eine Ventilationssteuerung auf mit gleichem Verhalten wie ursprünglich die Ae 6/6, Re 4/4 II und III und die Re 6/6. Sie könnte in analoger Weise optimiert werden (bedarfsabhängige Ventilationssteuerung). Die RBe 540 weisen jedoch ebenfalls eine beschränkte Restlebensdauer auf, diverse Triebwagen wurden bereits ausrangiert oder definitiv abgestellt. Eine Optimierung der Ventilationssteuerung ist deshalb auch hier nicht sinnvoll.

4.3 RBDe 560 „NPZ“

Die einzige realistische Massnahme bei den NPZ betrifft die Abschaltung der Ölpumpen in Parkstellung, analog zur Re 450. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die NPZ noch keine echte Parkstellung aufweisen, diese aber nachgerüstet wird. Die Hochrechnung ergibt:

- Pumpenleistung 2.8 kW
- Parkstellungszeit rund 6.5 h pro Jahr, gemittelt über das ganze Jahr (Angaben SBB)
- Umbaukosten abzuklären im Zusammenhang mit der anlaufenden Totalrevision

Ergebnis:

NPZ	Abschaltung Ölpumpe in Parkstellung		0.75 GWh/Jahr
------------	-------------------------------------	--	---------------

4.4 RABe 500 „ICN“

Bei den 44 ICN-Zügen ist die Zwischenkreisspannung bereits arbeitspunktabhängig geregelt, so dass dort nur noch ein sehr kleines Restpotential für Energieeinsparungen verbleibt. Nach Angaben von Bombardier ist der Motorfluss aber immer auf seinem jeweiligen Maximum. Er kann zugkraftabhängig reduziert werden, sofern sich der Motor nicht im Feldschwächbetrieb befindet. Dies ist unterhalb von etwa 70 km/h der Fall, würde also bei allen Bahnhof-Ein- und Ausfahrten und bei Langsamfahrstellen wirksam. Eine detaillierte Untersuchung liegt nicht vor, wäre aber nach Vorliegen der genauen Komponentendaten mit unseren Programmen machbar. Wir schätzen die Einsparungen deshalb nur grob:

- Gesamtverbrauch Flotte ICN nach Angaben SBB: 120 GWh/Jahr
- Kosten: um den notwendigen Offerten durch die Fahrzeugindustrie für Erstellung und Absicherung der Softwareänderung nicht vorzugreifen, wird keine Kostenschätzung aufgeführt.

Ergebnis:

RABe 500 (ICN)	Optimierte Zwischenkreisspannung	0.3 %	0.4 GWh/Jahr
-----------------------	----------------------------------	-------	--------------

Zusätzlich ist eine Erhöhung der Bremsleistung auch für den ICN denkbar, von 5200 auf ca. 5450 kW am Rad. Eine Abschätzung ist hier sehr schwierig, da die ICN meistens elektrisch gebremst werden. Wir nehmen diese Massnahme deshalb nicht explizit in die Bilanz auf, empfehlen aber sie weiter zu verfolgen, da sie praktisch kostenlos ist (s. auch Re 460).

4.5 RABe 520 „Seetal-GTW“

Unserer Einschätzung nach sind auf den Seetal-GTW alle möglichen und sinnvollen Massnahmen ausgeschöpft, auch wenn vielleicht nicht alle Werte wie der Motorfluss gegen den Arbeitspunkt auf dem theoretischen Optimum liegen. Angesichts der kleinen Flottengrösse sind spezielle Massnahmen nicht sinnvoll.

4.6 RABe 526 „Turbo-GTW“

Da die Turbo-GTW fast die gleiche Antriebsausrüstung aufweisen wie ein FLIRT, sind alle dort aufgeführten Massnahmen auch auf die GTW anwendbar. Abgeleitet aus den Werten für den Flirt ergibt sich folgende Hochrechnung:

- Geschätzter Verbrauch 35 Wh/tkm, 63 t pro 2-teiligem und 82 t pro 3-teiligem Zug, geschätzt 160'000 km/Jahr pro Zug
- Flottenverbrauch rund 29 GWh bei heute 51 2-teiligen und 24 3-teiligen Zügen
- Relative Einsparung rund 2.5 %, nach Abzug einer Reduktion für eventuelle dynamische Reserven in der Regelung
- Kosten: um den notwendigen Offerten durch die Fahrzeugindustrie für Erstellung und Absicherung der Softwareänderung nicht vorzugreifen, wird keine Kostenschätzung aufgeführt.

Ergebnis:

Turbo-GTW	Regloptimierung	2.5 %	0.7 GWh/Jahr
------------------	-----------------	-------	--------------

4.7 RABe 521 / 522 / 523 „FLIRT“

Die FLIRT-Triebzüge stehen im Einsatz auf der S-Bahn Basel und im Wiesental (RABe 521), der Stadtbahn Zug (RABe 523) und künftig grenzüberschreitend zwischen Basel und dem Elsass (RABe 522, Zweifrequenzzüge). Die Antriebs- und Hilfsbetriebeausrüstung all dieser Züge ist identisch.

Die FLIRT weisen bereits einen vom Arbeitspunkt abhängigen Motorfluss auf. Die Zwischenkreisspannung ist nur geschwindigkeitsabhängig. Dies diente als Referenzsituation für unsere Untersuchungen. Stadler und ABB haben inzwischen eine weiterentwickelte Antriebssoftware erprobt, diese aber aus Zulassungsgründen (Deutschlandzulassung / EBA) noch nicht aufgeschaltet. Es empfiehlt sich, vor einem Softwarewechsel alle möglichen Massnahmen der rechnerischen Optimierung genau auszuloten und dann erst den Releasewechsel vorzunehmen. Nach Rücksprache mit Stadler wird dieses Vorgehen auch dort begrüsst.

Unsere detaillierten Simulationen, durchgeführt mit den korrekten Komponentendaten mit ausdrücklicher Unterstützung von Stadler, (siehe auch [5]) ergeben folgende Hochrechnung:

- Geschätzter Verbrauch 35 Wh/tkm, 120 t pro Zug, geschätzt 160'000 km/Jahr pro Zug
- Flottenverbrauch rund 28 GWh bei heute 42 Zügen
- Relative Einsparung rund 2.5 %, nach Abzug einer Reduktion für eventuelle dynamische Reserven in der Regelung
- Kosten: um den notwendigen Offerten durch die Fahrzeugindustrie für Erstellung und Absicherung der Softwareänderung nicht vorzugreifen, wird keine Kostenschätzung aufgeführt.

Ergebnis:

FLIRT	Regloptimierung	2.5 %	0.7 GWh/Jahr
--------------	-----------------	-------	--------------

4.8 RABe 524 „Tilo-FLIRT“

Die RABe 524 sind die Zweisystem-Varianten des FLIRT. Sie werden zur Zeit abgeliefert und sind für den grenzüberschreitenden Regionalverkehr zwischen dem Tessin und der Lombardei vorgesehen („TiLo“). Technisch sind sie soweit wie möglich mit den FLIRT der Serien RABe 521 bis 523 identisch. Gegenüber diesen verfügen sie über eine zusätzliche 3-kV-Einspeisung für den Betrieb in Italien.

Energiesparmassnahmen, die für die RABe 521 bis 523 umgesetzt werden, können praktisch unverändert für die RABe 524 übernommen werden, jedoch nur für den Betrieb unter 15 kV, 16.7 Hz. Der Aufwand beschränkt sich auf die Anpassung der Software, grundsätzliche Neuentwicklungen sind keine nötig. Die Energieeinsparungen liegen dann im Netz der SBB in gleicher Grössenordnung wie bei den RABe 521 (S-Bahn Basel). Im 3-kV-Betrieb sind die möglichen Einsparungen kleiner. Sie wurden nicht näher untersucht.

Zusätzliche Aufwendungen entstehen unter Umständen durch eine Neuzulassung der Antriebssoftware in Italien, sofern die italienischen Zulassungsbehörden dies verlangen. Möglicherweise ist dies selbst dann der Fall, wenn die Softwareänderungen nur den Betrieb unter 15 kV, 16.7 Hz betreffen.

4.9 RABe 514 „DTZ“

Bei den DTZ Zügen sind nach Angaben von Siemens die wichtigen Massnahmen wie Anpassung der Zwischenkreisspannung und des Motorfluss an den Arbeitspunkt bereits implementiert. Zudem verfügen die Wagen über einen Heizsparbetrieb. Aus diesem Grund wird das Potential als sehr gering eingeschätzt.

5 Diesellokomotiven

Die modernen Diesellokomotiven der verschiedenen SBB-Divisionen sind aus technischer Sicht ausgereift. Zur Beheizung der Führerstände sind bereits Stillstandsheizungen eingebaut, so dass der Motor nicht durchgehend laufen muss.

6 Literatur

- [1] M. Meyer, S. Menth, M. Lerjen: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB: Schlussbericht zum BFE-Projekt 101826 / 152247 (Projektlaufzeit 1.9.2006 – 30.9.2007).
- [2] St. Menth, M. Meyer: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB. Bestandesaufnahme und Massnahmenübersicht. *emkamatik*-Dokument 06-0149, Version 2 vom 14.6.2007
- [3] M. Meyer: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB. Fragebogen zu technischen Massnahmen auf Triebfahrzeugen. *emkamatik*-Dokument 07-0193 vom 25.6.2007
- [4] M. Meyer, B. Schwab, R. Bänziger: Energiesparen dank verstärkter Ausnutzung der Rekuperationsbremse der Re 6/6 und Re 4/4 II der SBB. Schweizer Eisenbahn-Revue 6/1996
- [5] M. Meyer: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB. Betrieb der Triebfahrzeuge. *emkamatik*-Dokument 07-0205 vom 24.9.2007

Versionsinformation

--	24.9.2007	MM	---
1	1.10.2007	MM	Kleine Ergänzungen nach Review durch SBB BUC
2	13.12.2007	MM	Referenz [1] bezieht sich auf BFE-Schlussbericht statt Dokument 07-0203

© 2007 *emkamatik* GmbH, Wettingen. Dieses Dokument oder Informationen daraus dürfen ohne unsere ausdrückliche Erlaubnis nicht an Dritte weitergegeben werden.

Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB:

Betriebliche Massnahmen auf Triebfahrzeugen

Informationen zu diesem Dokument

Das vorliegende Dokument ist Teil des Schlussberichts zu der von *emkamatik* GmbH durchgeführten Studie „Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB“ [1]. Betriebliche Massnahmen, wie der Verzicht auf Doppeltraktion oder Leerfahrten, eine optimale Gefässgrösse etc. sind durchaus geeignet, den Energieverbrauch zu senken. Allerdings kann der Energiepreis allein nie ausschlaggebend dafür sein.

Das vorliegende Dokument enthält zudem die Ergebnisse der Simulationen für den Energieverbrauch verschiedener repräsentativer Zugfahrten im SBB-Netz.

1 Mögliche betriebliche Massnahmen

1.1 Reisezüge

Es gibt eine Unzahl betrieblicher Massnahmen, die den Energieverbrauch des Bahnsystems theoretisch senken können. Darunter fallen im Reiseverkehr:

- Anpassung der Anzahl Wagen an die tatsächliche Anzahl Reisende bei lokbespannten Zügen oder Pendelzügen, die aus Einzelwagen zusammengestellt werden.
- Bei festen Triebzugkompositionen Bildung aus der genau benötigten Anzahl. Als Spezialfall davon kann das „Flügeln“ von Zügen aufgefasst werden, also die Aufteilung in einer Unterwegsstation auf mehrere Züge zur Weiterfahrt in verschiedene Richtungen.
- Fahrt über Strecken, die einen tieferen Energieverbrauch erwarten lassen, z.B. Verzicht auf die Fahrt durch Tunnels mit hohen Geschwindigkeiten.

1.2 Güterzüge

Die möglichen Massnahmen sind analog zu den Reisezügen:

- Möglichst hohe Auslastung der Züge.
- Verzicht auf Doppeltraktion von Lokomotiven, wo dies aus traktionstechnischen Gründen nicht nötig ist.
- Verzicht auf Leerfahrten von Lokomotiven und Zügen.
- Fahrt über Strecken, die einen tieferen Energieverbrauch erwarten lassen, z.B. Verzicht auf oder Umgehung von Gebirgsstrecken (wobei hier nicht darauf geschlossen werden sollte, dass der Bau von Tunnels eine Massnahme zum Energiesparen ist, denn deren Bau kostet ebenfalls enorm viel Energie!)

1.3 Heutige Situation im SBB-Netz

Die aufgelisteten Massnahmen sind einleuchtend. Allerdings gibt es immer auch Randbedingungen, die zu beachten sind. So sind insbesondere Rangierarbeiten sehr teuer und oft von den Möglichkeiten der Infrastruktur her stark begrenzt, so dass Züge nicht beliebig verstärkt und geschwächt werden können. Güterverkehrsströme sind zudem oft stark asymmetrisch.

Das Trassenpreissystem der SBB rechnet die Verkehrsleistungen heute nach Bruttotonnenkilometern ab, differenziert nach verschiedenen Zugarten. Dies ist der stärkste Anreiz, die gefahrenen Kilometer, und damit auch den Energieverbrauch zu minimieren. Dazu kommen noch die geringere notwendige Vorhaltung von Rollmaterial bzw. die geringeren Unterhaltskosten durch reduzierte Fahrleistungen. Es drängen sich deshalb

aus Sicht der Studie keine weiteren Einzelmassnahmen auf. Zudem ist es ausserhalb des Fokus der Studie, Betriebsabläufe unter Einbezug aller Aspekte (Personalkosten, Infrastruktur etc.) im Detail zu untersuchen, wie dies für dafür notwendig wäre.

1.4 Zahlenbeispiele

In den Tabellen im Anhang zu diesem Dokument sind diverse Betriebsfälle simuliert. Der Leser kann daraus selbst Vergleiche ziehen für diverse Einzelfälle. An dieser Stelle sei auf folgende Vergleiche hingewiesen (Zahlenwerte siehe direkt in den Tabellen):

- Führung von Triebzügen mit einer oder mehreren Einheiten (ICN, FLIRT): der Energieverbrauch pro Sitzplatzkilometer ist naheliegenderweise fast unabhängig von der Anzahl Einheiten. D.h. der Energieverbrauch pro Personenkilometer verdoppelt sich beinahe, wenn zwei halb ausgelastete statt ein voll besetzter Zug verwendet werden.
- Dasselbe gilt in guter Näherung für die Verstärkung von Pendelzüge durch „Module“ (siehe Re 460).
- Der Verkehr von Intercity-Zügen durch den Lötschberg-Basistunnel führt zum Anstieg des Energiebedarfs, der sich selbst auf der Gesamtstrecke (Basel – Brig) deutlich auswirkt (siehe Re 460, Fälle F30 und F31).
- Durch die Verkürzung der Haltestellendistanzen steigt der Energieverbrauch im S-Bahn-Verkehr markant (FLIRT, im Vergleich Stadtbahn Zug gegen S-Bahn Basel oder Regionallinie nach Erstfeld).
- Für einen hier nicht näher dargestellten Fall wurde der Energieeinsparung ermittelt, wenn für einen Transitgüterzug Basel – Chiasso die zweite Lok (Re 4/4 II) erst in Erstfeld beigestellt wird und nicht bereits ab Basel zusammen mit der Re 6/6 durchläuft. Die Minderkosten für Energie belaufen sich auf rund 60 CHF. Diese Einsparung reicht nicht einmal aus, um den Personalmehraufwand für die Rangierkosten und Einrichten bzw. Aufheben der Vielfachsteuerung der beiden Loks zu decken.

Es liessen sich beliebige weitere Beispiele rechnen und auswerten, die oben gemachten Bemerkungen zur Rentabilität bleiben jedoch gültig. Der reduzierte Energiekonsum ist bei den heutigen Energiepreisen immer ein willkommener Nebeneffekt, kann jedoch für Änderungen der Betriebspraxis nicht ausschlaggebend sein.

Anhang

2 Simulationsresultate

2.1 Zweck der Tabellen

Die im folgenden zusammengefassten Simulationen wurden aus verschiedenen Gründen durchgeführt. Sie dienen nicht nur der groben Bewertung von betrieblichen Massnahmen (s. oben), sondern dienen gleichzeitig der Beurteilung von technischen Massnahmen auf Triebfahrzeugen und als Basis für die Abschätzung des durch eine optimierte Fahrweise und Betriebsführung erschliessbaren Sparpotentials.

2.2 Interpretation der Tabellen

Alle folgenden Tabellen sind gleich aufgebaut. Sie enthalten:

- Einen Code („Fall“ und „Var“), der den automatischen Aufruf der entsprechend parametrisierten Simulationsmodelle erlaubt. Jeder Fall stellt einen typischen Zuglauf dar.
- Triebfahrzeugtyp und Zug, ebenfalls codiert für den automatischen Aufruf der Simulationen.
- Strecke; ist mehr als eine Zeile pro Fall vorhanden, so ändert von einer Zeile zur nächsten die Zugs-komposition und / oder die Fahrrichtung.
- Ergebnisse: Energiebilanz für je eine Hin- und Rückfahrt mit dem entsprechenden Zug. Angegeben sind die gesamte Nettoaufnahme am Stromabnehmer und die prozentualen Anteile für Fahrwiderstand (Roll- und Luftwiderstand), die Energieaufnahme der mechanischen Bremsen sowie die Verluste in Antrieb und Hilfsbetrieben der Triebfahrzeuge. Komfortanlagen (Heizung, Lüftung, Klima, WC) sind darin nicht enthalten. Die potentielle Energie tritt nicht in Erscheinung, da die Höhenlage des Zuges am Anfang und Ende der Zugfahrten gleich ist.

- Der spezifische Verbrauch pro Tonnenkilometer, einschliesslich der Triebfahrzeuge.
- Bei den Reisezügen der spezifische Verbrauch pro Sitzplatzkilometer. Bei der Simulation selbst wird bei den Reisezügen von 50 % Auslastung ausgegangen (mittlere Zugsmasse), der Verbrauch ist jedoch auf 100 % der Sitzplätze bezogen. Stehplätze werden nicht berücksichtigt.

Es wird bewusst keine gewichtete Summenbildung für jede Fahrzeugflotte durchgeführt. Dies würde eine Aufarbeitung der Triebfahrzeugumläufe bedingen und schliesslich keine aussagekräftigeren Resultate ergeben, als sie sich beim Blick auf die einzelnen Zeilen der Tabellen auch ergeben.

2.3 Personen-Fernverkehr

Enthalten sind die ICN, die mit Re 460 geführten Züge (Pendelzüge IC 2000 und EW IV sowie lokbespannt) und einige mit Re 4/4 II bespannte Züge.

Fall	Var	Tfz	Zug	Strecke	Ergebnisse					
ICN					Fahrwid	Bremse	Antrieb	Bilanz		
F10	a	ICN	ICN	GEAP - BI - ZUE	56%	0%	44%	5881 kWh	22.0 Wh/tkm	17.1 Wh/skm
				ZUE - SG						
	b	ICN	ICN(2)	GEAP - BI - ZUE	56%	0%	44%	11661 kWh	21.8 Wh/tkm	16.9 Wh/skm
				ZUE - SG						
F11	a	ICN	ICN	LS - BI - BS	55%	0%	45%	2715 kWh	20.7 Wh/tkm	16.0 Wh/skm
	b	ICN	ICN(2)	LS - BI - BS	55%	0%	45%	5374 kWh	20.5 Wh/tkm	15.9 Wh/skm
F12	a	ICN	ICN	BI - OEN - ZUE	50%	0%	50%	3022 kWh	20.4 Wh/tkm	15.8 Wh/skm
				ZUE - KO						
F13	a	ICN	ICN	BN - LS	53%	0%	47%	1430 kWh	20.0 Wh/tkm	15.5 Wh/skm
Re 460					Fahrwid	Bremse	Antrieb	Bilanz		
F20	a	Re 460	IC2000(9;'q')	IO - BN	63%	2%	35%	6094 kWh	21.3 Wh/tkm	13.5 Wh/skm
			IC2000(9)	BN - ZUE						
			IC2000(9;'q')	ZUE - RH						
F20	b	Re 460	IC2000(9;'q')+Modul(3)	IO - BN	64%	3%	33%	7430 kWh	20.6 Wh/tkm	13.3 Wh/skm
			IC2000(9)+Modul(3)	BN - ZUE						
			IC2000(9;'q')+Modul(3)	ZUE - RH						
F21	a	Re 460	IC2000(8)	BS - AA - ZUE	59%	2%	39%	4150 kWh	20.4 Wh/tkm	12.2 Wh/skm
			IC2000(8;'q')	ZUE - CH						
	b	Re 460	IC2000(8)+Modul(4)	BS - AA - ZUE	60%	3%	37%	5409 kWh	19.3 Wh/tkm	11.7 Wh/skm
			IC2000(8;'q')+Modul(4)	ZUE - CH						
F22	a	Re 460	IC2000(8)	LZ - ZUE	52%	4%	44%	1436 kWh	21.6 Wh/tkm	12.9 Wh/skm
			IC2000(8;'q')	ZUE - ZFH						
	b	Re 460	IC2000(8)+Modul(3)	LZ - ZUE	53%	5%	42%	1761 kWh	20.6 Wh/tkm	12.7 Wh/skm
			IC2000(8;'q')+Modul(3)	ZUE - ZFH						
F23	a	Re 460	IC2000(6)	BN - BI	44%	5%	51%	551 kWh	21.0 Wh/tkm	13.5 Wh/skm
F24	a	Re 460	IC2000(10)	GEAP - BN - ZUE	63%	2%	35%	8593 kWh	19.7 Wh/tkm	12.4 Wh/skm
			IC2000(10;'q')	ZUE - SG						
F25	a	Re 460	IC2000(8)	LS - BN	55%	2%	43%	1623 kWh	17.0 Wh/tkm	10.2 Wh/skm
F30	a	Re 460	PendelEWIV(11;'q')	BS - BN	63%	2%	35%	5880 kWh	23.2 Wh/tkm	17.5 Wh/skm
			PendelEWIV(11)	BN - KA - BR						
F31	a	Re 460	PendelEWIV(11;'q')	BS - BN	68%	2%	30%	6286 kWh	26.2 Wh/tkm	19.8 Wh/skm
			PendelEWIV(11)	BN - VI - BR						
F32	a	Re 460	PendelEWIV(8)	GEAP - BR	58%	4%	38%	4331 kWh	22.7 Wh/tkm	17.9 Wh/skm
F33	a	Re 460	PendelEWIV(7)	GEAP - LZ	62%	2%	36%	5037 kWh	22.6 Wh/tkm	18.0 Wh/skm
F34	a	Re 460	PendelEWIV(7)	BN - BDF - ZUE	55%	2%	43%	2856 kWh	21.0 Wh/tkm	16.7 Wh/skm
			PendelEWIV(7;'q')	ZUE - SH						
F35	a	Re 460	EC(6)	BS - BN	62%	1%	37%	4814 kWh	26.1 Wh/tkm	21.7 Wh/skm
			EC(6)	BN - KA - DO						
F36	a	Re 460	EC(6)	BS - BN	66%	1%	33%	5157 kWh	29.3 Wh/tkm	24.4 Wh/skm
			EC(6)	BN - VI - DO						
F37	a	Re 460	EC(6)	LZ - CHI	50%	1%	49%	3261 kWh	19.6 Wh/tkm	16.3 Wh/skm
F38	a	Re 460	EC(11)	BS - AA - ZUE	60%	3%	37%	5078 kWh	20.6 Wh/tkm	15.9 Wh/skm
			EC(11)	ZUE - CH						
Re 4/4 II					Fahrwid	Bremse	Antrieb	Bilanz		
F40	a	Re 4/4 II	EC(6)	BS - LZ	50%	9%	41%	1721 kWh	25.6 Wh/tkm	21.3 Wh/skm

F41	a	Re 4/4 II	EC(11)	BS - AA - ZUE	54%	13%	33%	5584 kWh	22.7 Wh/tkm	17.5 Wh/skm
			EC(11)	ZUE - CH						
F42	a	Re 4/4 II	EWIV(7)	SG - BU - CH	37%	21%	42%	2523 kWh	30.9 Wh/tkm	25.6 Wh/skm
F43	a	Re 4/4 II	EC(4)	BR - ZUE	54%	2%	44%	2892 kWh	23.7 Wh/tkm	21.5 Wh/skm

2.4 Personen-Regionalverkehr

In der Tabelle enthalten sind die Züge FLIRT und NPZ. Die Simulation der GTW war aus zeitlichen Gründen nicht möglich (fehlendes Verlustmodell). Für die DPZ (Doppelstock-Pendelzüge mit Re 450) fehlt ebenfalls das Verlustmodell. Es ist aufgrund der speziellen Schaltung der Traktionsstromkreise der Re 450 (offene Motorwicklungen mit Gleichphasen-Glättungsdrösselspule) nur mit deutlichem Zusatzaufwand zu erzeugen (siehe auch [2]).

Fall	Var	Tfz	Zug	Strecke						
DPZ					Fahrwid	Bremse	Antrieb	Bilanz		
R20	a	DPZ	DPZ	BG - ZUE - WGR						
	b	DPZ	DPZ(2)	BG - ZUE - WGR						
	c	DPZ	DPZ(3)	BG - ZUE - WGR						
R21	a	DPZ	DPZ	ZG - ZUE - UST						
	b	DPZ	DPZ(2)	ZG - ZUE - UST						
	c	DPZ	DPZ(3)	ZG - ZUE - UST						
R22	a	DPZ	DPZ	EF - ZFH - ZUE						
				ZUE - ZEN - ZB						
	b	DPZ	DPZ(2)	EF - ZFH - ZUE						
				ZUE - ZEN - ZB						
	c	DPZ	DPZ(3)	EF - ZFH - ZUE						
				ZUE - ZEN - ZB						
FLIRT					Fahrwid	Bremse	Antrieb	Bilanz		
R30	a	Flirt	Flirt	LZ - BAA	26%	0%	74%	375 kWh	47.7 Wh/tkm	33.4 Wh/skm
	b	Flirt	Flirt(2)	LZ - BAA	26%	0%	74%	744 kWh	47.4 Wh/tkm	33.2 Wh/skm
R31	a	Flirt	Flirt	ZG - ER	40%	0%	60%	455 kWh	37.5 Wh/tkm	26.2 Wh/skm
	b	Flirt	Flirt(2)	ZG - ER	39%	0%	61%	901 kWh	37.1 Wh/tkm	26.0 Wh/skm
R32	a	Flirt	Flirt	DMT - BS	36%	0%	64%	698 kWh	35.5 Wh/tkm	24.9 Wh/skm
				BS - PR - OL						
	b	Flirt	Flirt(2)	DMT - BS	36%	0%	64%	1382 kWh	35.1 Wh/tkm	24.6 Wh/skm
				BS - PR - OL						
GTW					Fahrwid	Bremse	Antrieb	Bilanz		
R40	a	GTW	GTW26	W - WF						
	b	GTW	GTW26(2)	W - WF						
R41	a	GTW	GTW26	W - WIL						
	b	GTW	GTW26(2)	W - WIL						
R42	a	GTW	GTWSe	LZ - LB						
NPZ					Fahrwid	Bremse	Antrieb	Bilanz		
R50	a	NPZ	NPZ(4)	SIO - BR	39%	4%	57%	697 kWh	37.3 Wh/tkm	23.9 Wh/skm
R51	a	NPZ	NPZ(4)	BI - OL	24%	7%	69%	963 kWh	45.5 Wh/tkm	29.1 Wh/skm
R52	a	NPZ	NPZ(5)	BS - FCK	28%	6%	66%	601 kWh	39.4 Wh/tkm	23.1 Wh/skm
R53	a	NPZ	NPZ(5)	OL - LZ	36%	5%	59%	765 kWh	33.0 Wh/tkm	19.3 Wh/skm
R54	a	NPZ	NPZ(4)	AA - RK	28%	6%	66%	689 kWh	41.8 Wh/tkm	26.8 Wh/skm
R55	a	NPZ	NPZ(5)	ZUE - LIN	46%	5%	49%	890 kWh	25.3 Wh/tkm	14.9 Wh/skm
R56	a	NPZ	NPZ(4)	RW - LIN	23%	8%	69%	789 kWh	42.8 Wh/tkm	27.4 Wh/skm

Bei den Zahlen zum NPZ ist zu bedenken, dass die durch den schlechten Leistungsfaktor dieses Zuges (Anschnittsteuerung) gegenüber anderen Fahrzeugen verursachten erhöhten Verluste in den Energieversorgungsnetzen in diesem Vergleich nicht berücksichtigt sind.

2.5 Güterverkehr

Die Tabelle enthält diverse Güterzüge, die mit unterschiedlichen Lokomotiven bespannt sind. „Re 10/10“ steht für eine Doppeltraktion aus Re 4/4 II und Re 6/6, „Re 8/8“ als eine Doppeltraktion aus zwei Re 4/4 II. Verlustmodelle für die Mehrsystem-Güterzuglokomotiven Re 482, Re 474 und Re 484 fehlen (siehe auch [2]), somit auch die zugehörigen Resultate. Bei leeren Zügen wird angenommen, dass der Luftwiderstand gegenüber dem beladenen konstant bleibt. Leere Containerzüge sind also als Züge, die mit leeren Containern beladen sind, zu verstehen. Für einige Bemerkungen zur Modellierung des Fahrwiderstands der Güterzüge ist ebenfalls auf [2] verwiesen.

Fall	Var	Tfz	Zug	Strecke	Ergebnisse				
MS-Loks					Fahrwid	Bremse	Antrieb	Bilanz	
G10	a	Re 484	Intermodal(voll;1600)	BEL - LI					
	b	Re 484	Intermodal(2/3;1200)	BEL - LI					
	c	Re 484	Intermodal(leer;400)	BEL - LI					
G20	a	Re 482	Intermodal(voll;1600)	BSRB - BG - GD					
	b	Re 482	Intermodal(2/3;1200)	BSRB - BG - GD					
	c	Re 482	Intermodal(leer;400)	BSRB - BG - GD					
G30	a	Re 474	Intermodal(voll;1600)	BEL - LI					
	b	Re 474	Intermodal(2/3;1200)	BEL - LI					
	c	Re 474	Intermodal(leer;400)	BEL - LI					
Re 10/10					Fahrwid	Bremse	Antrieb	Bilanz	
G40	a	Re 10/10	Intermodal(voll;1360)	BSRB - BG - CHSM	44%	16%	40%	20234 kWh	21.1 Wh/tkm
	b	Re 10/10	Intermodal(2/3;1020)	BSRB - BG - CHSM	47%	15%	38%	17716 kWh	23.6 Wh/tkm
	c	Re 10/10	Intermodal(leer;340)	BSRB - BG - CHSM	62%	1%	37%	12180 kWh	36.4 Wh/tkm
	d	Re 10/10	Intermodal(voll;1600)	BSRB - BG - ER	52%	3%	45%	20472 kWh	18.0 Wh/tkm
			Intermodal(voll;1600)+qRe460	ER - CHSM					
	e	Re 10/10	Intermodal(voll;1600)	BSRB - BG - ER	43%	19%	38%	11734 kWh	21.2 Wh/tkm
			Intermodal(voll;1600)+qRe460	ER - GOE					
			Intermodal(voll;1600)	GOE - GIU					
			Intermodal(voll;1600)+qRe460	GIU - RIB					
			Intermodal(voll;1600)	RIB - CHSM					
	f	Re 460	-	GOE - ER					
			-	RIB - GIU					
G41	a	Re 10/10	Intermodal(voll;1360)	BSRB - BG - BEL	46%	15%	39%	16705 kWh	21.1 Wh/tkm
	b	Re 10/10	Intermodal(2/3;1020)	BSRB - BG - BEL	49%	14%	37%	14700 kWh	23.7 Wh/tkm
	c	Re 10/10	Intermodal(leer;340)	BSRB - BG - BEL	63%	1%	36%	10347 kWh	37.6 Wh/tkm
	d	Re 10/10	Intermodal(voll;1600)	BSRB - BG - ER	54%	2%	44%	16892 kWh	18.1 Wh/tkm
			Intermodal(voll;1600)+qRe460	ER - BEL					
G42	a	Re 10/10	Intermodal(voll;1360)	BSRB - KA - DOII	50%	14%	36%	17370 kWh	22.0 Wh/tkm
	b	Re 10/10	Intermodal(2/3;1020)	BSRB - KA - DOII	53%	13%	34%	15430 kWh	25.0 Wh/tkm
	c	Re 10/10	Intermodal(leer;340)	BSRB - KA - DOII	66%	1%	33%	11226 kWh	40.9 Wh/tkm
G43	a	Re 10/10	Intermodal(voll;1360)	BSRB - VI - DOII	60%	6%	34%	15044 kWh	20.0 Wh/tkm
	b	Re 10/10	Intermodal(2/3;1020)	BSRB - VI - DOII	62%	6%	32%	13682 kWh	23.2 Wh/tkm
	c	Re 10/10	Intermodal(leer;340)	BSRB - VI - DOII	70%	1%	29%	11124 kWh	42.4 Wh/tkm
G44	a	Re 10/10	-	BSRB - K LW	40%	0%	60%	1087 kWh	40.4 Wh/tkm
Re 6/6					Fahrwid	Bremse	Antrieb	Bilanz	
G50	a	Re 6/6	Kessel(voll;1800)	BSRB - OGL	59%	7%	34%	5320 kWh	15.4 Wh/tkm
G51	a	Re 6/6	Kessel(voll;1800)	CORN - OGL	68%	4%	28%	7760 kWh	14.2 Wh/tkm
G52	a	Re 6/6	Auto(voll;800)	BSRB - BG - CHSM	71%	3%	26%	20963 kWh	37.4 Wh/tkm
G53	a	Re 6/6	Intermodal(2/3;500)	BEL - LGV	36%	6%	58%	690 kWh	24.8 Wh/tkm
2 x Re 4/4 II					Fahrwid	Bremse	Antrieb	Bilanz	
G60	a	Re 8/8	Mixed(voll;2000)	LT - K LW	66%	4%	30%	12478 kWh	14.5 Wh/tkm
	b	Re 8/8	Mixed(leer;680)	LT - K LW	73%	2%	25%	9546 kWh	28.5 Wh/tkm
G61	a	Re 8/8	Mixed(voll;2000)	K LW - EBR	60%	9%	31%	6179 kWh	15.9 Wh/tkm
	b	Re 8/8	Mixed(leer;680)	K LW - EBR	71%	2%	27%	4527 kWh	29.8 Wh/tkm
Re 4/4 II					Fahrwid	Bremse	Antrieb	Bilanz	
G70	a	Re 4/4 II	Mixed(2/3;600)	EBI - RK	47%	13%	40%	312 kWh	24.2 Wh/tkm
G71	a	Re 4/4 II	Intermodal(2/3;600)	DEN - HRK - FF	69%	1%	30%	7086 kWh	20.1 Wh/tkm
Ae 6/6					Fahrwid	Bremse	Antrieb	Bilanz	
G80	a	Ae 6/6	Mixed(voll;1620)	LT - K LW	70%	5%	25%	8941 kWh	13.1 Wh/tkm

G81	a	Ae 6/6	Kessel(voll;1620)	CORN - OGL	72%	5%	23%	6602 kWh	13.2 Wh/tkm
G82	a	Ae 6/6	Kessel(voll;1620)	BSRB - OGL	61%	10%	29%	4480 kWh	14.2 Wh/tkm
G83	a	Ae 6/6	Mixed(voll;1620)	BSRB - BU	64%	8%	28%	8227 kWh	12.8 Wh/tkm
G84	a	Ae 6/6	Mixed(2/3;600)	EBI - RK	31%	21%	48%	399 kWh	29.3 Wh/tkm

2.6 Erkenntnisse

Die Interpretation der Werte der Tabellen bleibt dem Leser überlassen. An dieser Stelle wird lediglich auf ein paar interessante Beispiele hingewiesen:

- Die Werte für den Fernverkehr bewegen sich in einer engen Bandbreite. Sie sind zudem relativ nahe am Wert, der von den SBB für den durchschnittlichen Verbrauch der betreffenden Flotten angegeben wird (23.2 Wh/tkm für den ICN, 22.0 Wh/tkm für die Re 460, 26.1 Wh/tkm für die Re 4/4 II). Das Energiesparpotential im Fernverkehr, das durch die Fahrweise der Lokführer sowie durch die Zugsteuerung gemeinsam erschliessbar ist, beträgt deshalb nur rund 10 %. Dies stimmt ungefähr mit früheren, auf Messungen beruhenden Untersuchungen überein [3].
- Der zunehmende Verbrauch mit steigender Geschwindigkeit und durch längere Tunnels ist deutlich sichtbar.
- Im Regionalverkehr ist die Zunahme des Verbrauchs mit kürzer werdender Haltestellendistanz (z.B. Stadtbahn Zug gegen S-Bahn Basel) offensichtlich.
- Die Übereinstimmung mit den von SBB angegebenen Werten für den Flottenverbrauch ist auch im Regionalverkehr gut (NPZ: 43.0 kWh/tkm, FLIRT 40.6 kWh/tkm). Für den FLIRT stehen aus der Messung vermutlich noch zu wenige Angaben zur Verfügung. Für den NPZ können, ähnlich wie im Fernverkehr, maximal 10 % gemeinsam durch Fahrweise und Zugsteuerung erwartet werden.
- Im Güterverkehr ist die Streuung der Verbrauchswerte am grössten. Vor allem leere Züge haben einen relativ hohen spezifischen Energiebedarf. Beladene Blockzüge, die über grosse Distanzen fahren, haben dagegen einen sehr geringen Verbrauch, auch wenn sie mit alten Lokomotiven wie der Ae 6/6 bespannt sind.

3 Optimierte Reglersollwerte auf Umrichtertriebfahrzeugen

3.1 Allgemeines

Massnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs, welche während der Fahrt wirksam sind und vom momentanen Arbeitspunkt des Antriebs (Geschwindigkeit, Zugkraft) abhängen, können nur durch eine Simulation über typische Lastspiele bewertet werden.

Stellvertretend für diesen Fall sind im folgenden die Ergebnisse für die Re 460 (Optimierung des Sollwerts der Zwischenkreisspannung) und des Flirt (Sollwerte für Zwischenkreisspannung und Motorfluss) dargestellt. Die Simulationen wurden für die gleichen Zugfahrten durchgeführt wie in den Tabellen oben.

3.2 Re 460

Für die Re 460 wird nur die „Optimierungsstufe 1“ angenommen, also die optimale arbeitspunktabhängige Wahl des Sollwerts für die Zwischenkreisspannung. Von den Ergebnissen (rund 1.5 %) dürfte der grössere Teil bei sorgfältiger Optimierung der Software vermutlich erreichbar sein, in Realität vielleicht 1.2 %.

Für die „Optimierungsstufe 2“, also die zusätzliche Optimierung des Motorflusses gegen den Arbeitspunkt, liegen bisher keine Verlustmodelle vor, da sie für den Motor selbst zwar einfach herzuleiten sind, aber auf komplexe Art von den Stromrichterverlusten und den durch den Stromrichter verursachten Verlusten im Motor abhängen.

Re 460				Heute	Optimiert	
F20	a	Re 460	IC2000(9;'q')	IO - BN	6094 kWh	6022 kWh
			IC2000(9)	BN - ZUE		
			IC2000(9;'q')	ZUE - RH		
F20	b	Re 460	IC2000(9;'q')+Modul(3)	IO - BN	7430 kWh	7367 kWh
			IC2000(9)+Modul(3)	BN - ZUE		
			IC2000(9;'q')+Modul(3)	ZUE - RH		

F21	a	Re 460	IC2000(8)	BS - AA - ZUE	4150 kWh	4090 kWh	-1.4 %
			IC2000(8;'q')	ZUE - CH			
	b	Re 460	IC2000(8)+Modul(4)	BS - AA - ZUE	5409 kWh	5358 kWh	-0.9 %
			IC2000(8;'q')+Modul(4)	ZUE - CH			
F22	a	Re 460	IC2000(8)	LZ - ZUE	1436 kWh	1406 kWh	-2.0 %
			IC2000(8;'q')	ZUE - ZFH			
	b	Re 460	IC2000(8)+Modul(3)	LZ - ZUE	1761 kWh	1736 kWh	-1.4 %
			IC2000(8;'q')+Modul(3)	ZUE - ZFH			
F23	a	Re 460	IC2000(6)	BN - BI	551 kWh	539 kWh	-2.1 %
F24	a	Re 460	IC2000(10)	GEAP - BN - ZUE	8593 kWh	8497 kWh	-1.1 %
			IC2000(10;'q')	ZUE - SG			
F25	a	Re 460	IC2000(8)	LS - BN	1623 kWh	1581 kWh	-2.5 %
F30	a	Re 460	PendelEWIV(11;'q')	BS - BN	5880 kWh	5822 kWh	-0.9 %
			PendelEWIV(11)	BN - KA - BR			
F31	a	Re 460	PendelEWIV(11;'q')	BS - BN	6286 kWh	6249 kWh	-0.6 %
			PendelEWIV(11)	BN - VI - BR			
F32	a	Re 460	PendelEWIV(8)	GEAP - BR	4331 kWh	4282 kWh	-1.1 %
F33	a	Re 460	PendelEWIV(7)	GEAP - LZ	5037 kWh	4948 kWh	-1.7 %
F34	a	Re 460	PendelEWIV(7)	BN - BDF - ZUE	2856 kWh	2792 kWh	-2.2 %
			PendelEWIV(7;'q')	ZUE - SH			
F35	a	Re 460	EC(6)	BS - BN	4814 kWh	4694 kWh	-2.4 %
			EC(6)	BN - KA - DO			
F36	a	Re 460	EC(6)	BS - BN	5157 kWh	5089 kWh	-1.3 %
			EC(6)	BN - VI - DO			
F37	a	Re 460	EC(6)	LZ - CHI	3261 kWh	3049 kWh	-6.5 %
F38	a	Re 460	EC(11)	BS - AA - ZUE	5078 kWh	5026 kWh	-1.0 %
			EC(11)	ZUE - CH			
			Ungewichtete Summe		79747 kWh	78547 kWh	-1.5 %

Hinweis zu den angegebenen 6.5 % Einsparung auf der Strecke Luzern – Chiasso: die Lokomotive arbeitet dort häufig mit einer kritischen Aussteuerung des Stromrichters. In diesen Arbeitspunkten ist aber auch die Modellierung unsicher. Diese Zahl ist somit mit Vorsicht zu interpretieren.

3.3 FLIRT

Für den FLIRT „optimiert“ wird das theoretisch erreichbare Optimum aus Zwischenkreisspannung und Motorfluss angenommen. In Realität wird dieses nicht ganz erreichbar sein, da evtl. noch Regelreserven für dynamische Vorgänge erhalten bleiben müssen. Realistisch ist deshalb eine Verbrauchsreduktion von rund 1.5 % (Stadtbahn Zug) bzw. 3 bis 3.5 % (übrige Einsätze).

FLIRT				Heute	Optimiert	
R30	a	Flirt	LZ - BAA	375 kWh	366 kWh	-2.4 %
	b	Flirt	Flirt(2) LZ - BAA	744 kWh	724 kWh	-2.6 %
R31	a	Flirt	ZG - ER	455 kWh	436 kWh	-4.1 %
	b	Flirt	Flirt(2) ZG - ER	901 kWh	863 kWh	-4.3 %
R32	a	Flirt	DMT - BS	698 kWh	665 kWh	-4.7 %
			BS - PR - OL			
	b	Flirt	Flirt(2) DMT - BS	1382 kWh	1317 kWh	-4.7 %
			BS - PR - OL			

4 Literatur

- [1] M. Meyer, S. Menth, M. Lerjen: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB: Schlussbericht zum BFE-Projekt 101826 / 152247 (Projektlaufzeit 1.9.2006 – 30.9.2007).
- [2] M. Meyer: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB: Beschreibung der Modelle und Rechentools. emkamatik-Dokument 07-0210 vom 24.9.2007
- [3] 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

Versionsinformation

--	24.9.2007	MM	---
1	1.10.2007	MM	Erweiterung nach Review durch SBB BUC
2	13.12.2007	MM	Referenz [1] bezieht sich auf BFE-Schlussbericht statt Dokument 07-0203

© 2007 *emkamatik* GmbH, Wettingen. Dieses Dokument oder Informationen daraus dürfen ohne unsere ausdrückliche Erlaubnis nicht an Dritte weitergegeben werden.

Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB:

Massnahmen auf Reisezugwagen

Informationen zu diesem Dokument

Das vorliegende Dokument ist Teil des Schlussberichts zu der von *emkamatik* GmbH durchgeführten Studie „Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB“ [1]. Darin wird das Energiesparpotential bei Reisezugwagen der SBB abgeschätzt. Die wirksamste Massnahme ist die optimierte Vorheizung und Klimatisierung bei parkierten Kompositionen („Konditionierung“). Das zugehörige Energiesparpotential wird mit thermischen Simulationen bestimmt.

1 Ausgangslage und Zusammenfassung

Im Übersichtsdokument [2] sind Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz bei Reisezugwagen aufgelistet. Die dort aufgelisteten Massnahmen umfassen die Themen Beleuchtung, Klimatisierung und Heizung.

In verschiedenen Gesprächen mit technisch verantwortlichen Mitarbeitern bei den SBB sind die Einsparmöglichkeiten beim Beleuchtungskonzept oder sonstigen Hilfsbetrieben entweder als sehr gering oder die Umsetzung von Massnahmen als sehr aufwendig eingeschätzt worden. Auf genauere Abschätzungen wird deshalb verzichtet.

Als sehr wirksam erweist sich der Heizsparbetrieb bei parkierten Reisezugwagen. In allen neuen, mit einer Leittechnik und Zugbussen ausgerüsteten Wagenflotten der SBB (IC 2000, ICN, DPZ, DTZ) sind Heizsparmodi bereits implementiert. Auf älteren Wagen (EW I und II, IV, sowie EC und IC-Bt Steuerwagen) ist noch kein Heizsparbetrieb implementiert, da im Zugverband kein Kommunikationskanal vorhanden ist.

Dennoch hat die Nachrüstung eines Heizsparbetriebs auf diesen Fahrzeugflotten mit insgesamt über 500 Wagen ein grosses Energiesparpotential. Zur Beurteilung konnte auf wertvolle praktische Erfahrung bei den Rhätischen Bahnen (RhB) zurückgegriffen werden. Die RhB hat ein Heizsparmodus für Fahrzeuge, welche ebenfalls keinen Zugbus haben, entwickelt und seit zwei Jahren erfolgreich in Betrieb.

Das vorliegende Dokument schätzt das Energiesparpotential hochgerechnet auf die gesamte betreffende Personenwagenflotte von SBB-P ab.

2 Heizsparbetrieb bei parkierten Reisezügen

2.1 Erfahrungen anderer Bahnbetreiber gem. EVENT-Datenbank [3]

Als Beispiel ist eine Anwendung in Schweden erwähnt, bei welcher die Soll-Temperatur von 18 – 20° im Normalbetrieb auf 12° bei parkierten Zügen reduziert wird. Die Steuerung erfolgt über eine einfache Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Wichtig ist, dass der Frostschutz gewährleistet ist, d.h. die Heizung die Temperatur von kritischen Geräten über dem Gefrierpunkt hält. Aus diesem Grund sind die eingebauten Steuerungsgeräte redundant, als doppelt vorhanden. Genauere Details sind jedoch nicht dokumentiert.

2.2 Ansatz und Erfahrungen der Rhätischen Bahnen RhB

Die Rhätischen Bahnen (RhB) haben an ihren ca. 200 Personenwagen einen einfachen aber wirksamen Heizsparbetrieb realisiert [4].

Die Wagen fallen selbständig in den Heizsparmodus, sobald die Zugbeleuchtung während mindestens einer Stunde ausgeschaltet ist. Im Sparmodus beträgt der Temperatur-Sollwert 5 bis 8 °C. Durch eine übergeordnete Instanz – so genannte „Heiz-Master“ – werden die „Heiz-Slaves“ aus dem Sparmodus aufgeweckt und gehen in den normalen Modus über. Pro Zug wird ein Heiz-Master benötigt. Die Master sind mit einer

programmierbaren Schaltuhr mit Kalenderfunktion und Sommerzeitschaltung ausgerüstet und werden mit einer Weckzeit zwischen 04:00 und 05:00 Uhr programmiert. Die Weckzeiten sind gestaffelt programmiert, um die Belastung durch Einschaltströme zu verteilen.

Weil kein digitaler Zugbus vorhanden ist wird die Ader „Zugbeleuchtung“ der LBT-Leitung (Licht / Beleuchtung / Türen) als Kommunikationsmittel im Zug verwendet. Wenn die Zugbeleuchtung eingeschaltet wird verlassen die Heiz-Slaves den Sparmodus und regeln auf den normalen Temperatur-Sollwert.

Die Massnahme spart neben viel Energie auch viele frühmorgendliche Personaleinsätze zum Einschalten der Wagenheizungen. Die Kosten für die Nachrüstung betrugen ca. CHF 400 pro Wagen.

In Messreihen wurde das geschätzte Einsparpotential bestätigt. Insgesamt konnten im ersten Betriebsjahr 4'879 MWh oder 24 MWh pro Wagen Heizenergie eingespart werden. Dies entspricht ca. 6% (!) des gesamten RhB-Energieverbrauchs. Interessant ist übrigens, dass die RhB ca. 26 GWh oder 30% des Energieverbrauchs für die Beheizung respektive Klimatisierung von Reisezügen und ca. 56 GWh für Traktionsleistungen verbraucht.

3 Schätzung des Einsparpotentials bei den SBB

Zur Abschätzung des Sparpotentials muss als Grundlage der heutige Zustand der wichtigsten Fahrzeugtypen dokumentiert werden. Unter Berücksichtigung von Fahrzeug-Kenndaten und Klimadaten kann das Potential recht genau abgeschätzt werden.

3.1 Heutige Situation bei den SBB

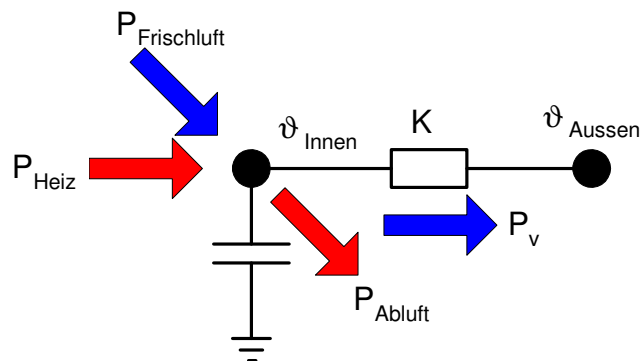
Der Stand des Heizsparmodus ist bei den unterschiedlichen Fahrzeugtypen unterschiedlich. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick.

Fahrzeugtyp	Technischer Stand	Bewertung
IC 2000 (308 Wagen)	Heizsparbetrieb vorhanden. Durch Zugpersonal programmierbare Bereitstellzeit	Wenig Potential für weitere Optimierungen.
ICN (44 x 7 = 308 Wagen)	Stand wie IC 2000	Wenig Potential für weitere Optimierungen.
EW IV / IC Bt (335 + 90 Wagen)	Kein Heizsparbetrieb. Wagen haben Klimarechner, es gibt aber keine Kommunikation zwischen Wagen.	Potential vorhanden.
Eurocity Wagen (54 Wagen)	Stand wie bei EW IV	Potential vorhanden.
DPZ (115 x 3 = 345 Wagen)	Modus „reduziertes Heizen“ / „Standby“ automatisch von 23 h bis 04 h.	Potential bei Programmierung einer effektiven Bereitstellzeit durch das Personal.
NPZ / EW II (500 Wagen)	Kein Energiesparmodus.	Potential ungewiss, es läuft grosse NPZ-Erneuerung.
DTZ (35 x 4 = 140 Wagen)	Automatischer Energiesparmodus mit programmierbaren Bereitstellzeiten.	Wenig Potential für weitere Optimierungen.
FLIRT (~100 x 4 = 400 Wagen)	Automatischer Energiesparmodus mit Sollwert 4 – 6 °. Wird beendet durch Besetzen des Führerstandes.	Wenig Potential für weitere Optimierungen.
GTW Turbo (RABe 526) (80 x 2 = 160 Wagen)	Automatischer Energiesparmodus. Wird beendet durch Besetzen des Führerstandes.	Wenig Potential für weitere Optimierungen.
GTW Seetal (RABe 520) (17 x 3 = 51 Wagen)	Automatischer Energiesparmodus. Wird beendet durch Besetzen des Führerstandes.	Wenig Potential für weitere Optimierungen.

Bei den neuen Fahrzeugflotten ist bereits ein Sparmodus implementiert, so dass dort allenfalls noch Feinoptimierungen möglich sind. Erstaunlicherweise sind der EW IV und die mit ihm verwandten Fahrzeuge (EC, IC Bt Steuerwagen) nicht mit einem Sparmodus ausgerüstet. Diese Fahrzeuge sind mit einem Klimarechner ausgerüstet, aber es existiert kein Zugbus, über welchen die Befehle zur Aktivierung respektive zum Verlassen des Heizsparmodes gegeben werden könnte.

3.2 Methode zur Berechnung des Energiesparpotentials

Zur Abschätzung des Energieverbrauchs der Wagenheizung wurde ein einfaches thermisches Modell erstellt. Wärme wird über die Heizleistung P_{Heiz} und den Zustrom von Frischluft ins Fahrzeuginnere eingeleitet und sie fliesst über die Wärmeableitung durch die Fahrzeughülle und die ausgeblasene Abluft aus dem Fahrzeug ab. Bei reinem Umluftbetrieb fällt im Modell der Frischluft und Abluftstrom weg.

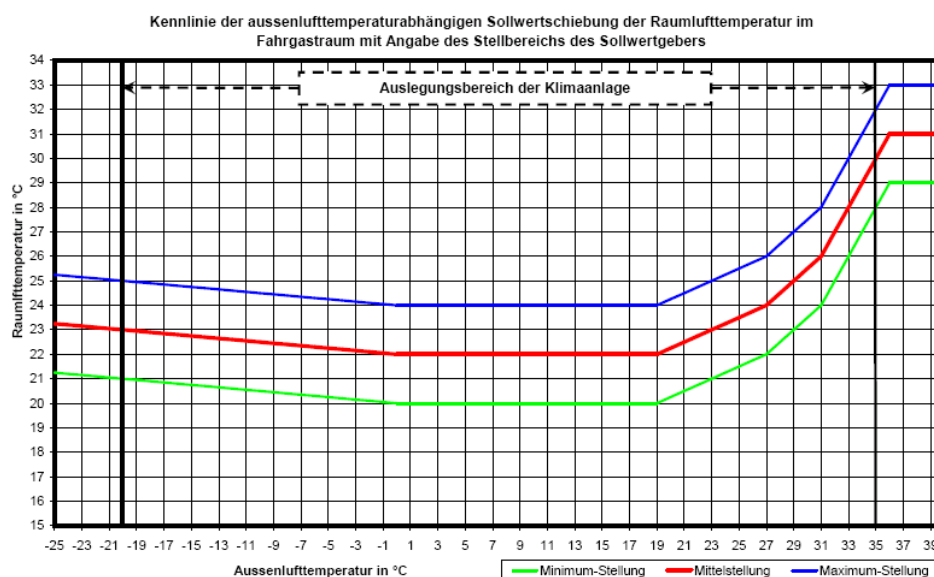


Das thermische Verhalten des Fahrzeugs wird durch folgende Parameter bestimmt:

Der *Wärmedurchgangskoeffizient* K bestimmt den Wärmefluss vom Fahrzeuginnern an die Umgebungsluft. Der Wert für den EW IV beträgt $k = 1.8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Mit der Mantelfläche des Fahrzeugs von ca. 416 m^2 ergibt sich $K = 748.8 \text{ J/K}$. Die *Wärmekapazität* C bestimmt das Wärmespeichervermögen des Fahrzeugs. Diese Werte wurden für den EW IV nie direkt aus Messungen ermittelt sondern es wird ein Wert ($44 \text{ kJ/m}^2\text{K}$) für typische Reisezugwagen aus der Fachliteratur verwendet. Mit der Mantelfläche ergibt sich daraus $C = 18'304 \text{ kJ/K}$. Die Werte K und C bestimmen die thermische Zeitkonstante des Fahrzeugs.

Die *Heizleistung* P_{Heiz} bestimmt, wie schnell das Fahrzeug aufgeheizt werden kann; je höher die Heizleistung ist, desto schneller kann das Fahrzeug bei gegebener thermischer Zeitkonstante aufgeheizt werden. Der *Temperatur-Sollwert* ϑ_{soll} [°C] schliesslich bestimmt die Vorgabe an die Heizungsregelung. Er ist abhängig von der Aussenlufttemperatur. Das folgende Bild zeigt die Abhängigkeit für den EW IV und den Eurocity-Wagen.

Den *Volumenstrom* Q von *Frischluf* und *Abluf*. Die durch die Frischluft eingebrachte Wärmeleistung beträgt $P_{\text{Frischluf}} = Q \times \rho_{\text{Luft}} \times c_{\text{Luft}} \times \vartheta_{\text{Aussen}}$, die mit der Abluft abgehende Leistung $P_{\text{Abluft}} = Q \times \rho_{\text{Luft}} \times c_{\text{Luft}} \times \vartheta_{\text{Innen}}$.



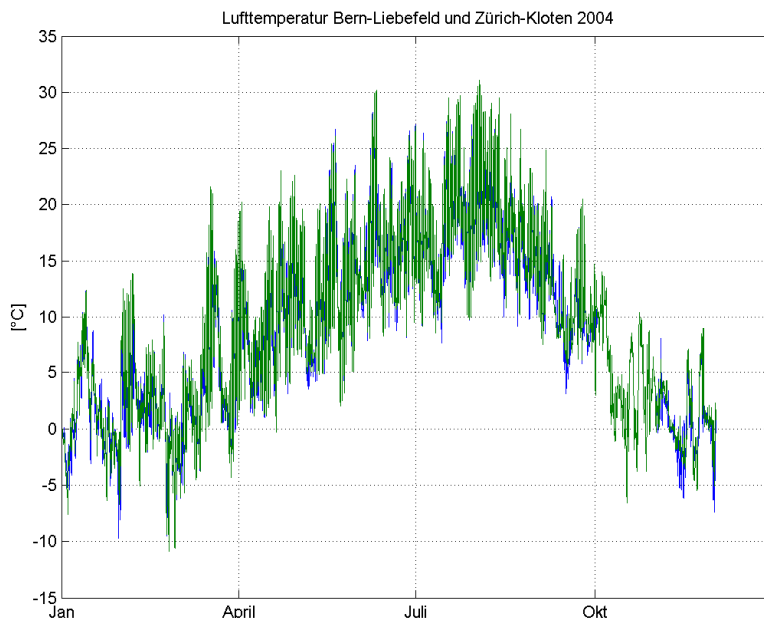
Der Temperaturregler wurde als Zweipunkt-Regler nachgebildet, welcher die Heizung mit einer 2 °C breiten Hysterese ein- und ausschaltet. Zur Vereinfachung sind beim Heizungsmodell nur die beiden Zustände „aus“ oder „volle Leistung“ implementiert.

Bemerkungen zum Modell

Die EW-IV-Fahrzeuge arbeiten in Parkstellung im Umluftbetrieb. Der einzige Weg für den Wärmeaustausch mit der Umgebung ist der Wärmefluss durch die Mantelfläche. Vernachlässigt wurde der Wärmeeintrag durch Sonneneinstrahlung, Passagiere und andere Verbraucher wie Lüfter, Beleuchtung, Leittechnik oder WC-Anlagen. Zudem ist der Wärmeverlust durch geöffnete Fenster und Türen sowie zusätzliche Kühlung durch den Fahrtwind vernachlässigt. Die ermittelte absolute Heizenergie ist deshalb mit einer Ungenauigkeit behaftet, für einen Vergleich von verschiedenen Heizstrategien resultieren aber vernünftige Grössenordnungen, da bei verschiedenen Strategien jeweils die gleichen Vernachlässigungen und Vereinfachungen gelten. Da die Heizstrategien nur während der Nacht bei parkiertem Fahrzeug geändert werden haben Passagiere, Sonneneinstrahlung und zusätzliche Verluste wegen des Fahrtwindes keinen Einfluss auf den Vergleich.

Klimatische Parameter

Die Aussenlufttemperatur hat den grössten Einfluss auf die benötigte Heizenergie. Für die Simulation konnte auf gemessene Temperaturverläufe für das Jahr 2004 an den Messorten Bern-Liebelfeld und Zürich-Kloten zurückgegriffen werden. Die Daten mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde stammen von der schweizerischen Meteorologischen Anstalt in Zürich. Die Lufttemperaturverläufe sind im folgenden Bild dargestellt. Die Jahres-Durchschnittstemperatur beträgt an beiden Orten knapp 9°C; die täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen sind deutlich erkennbar.

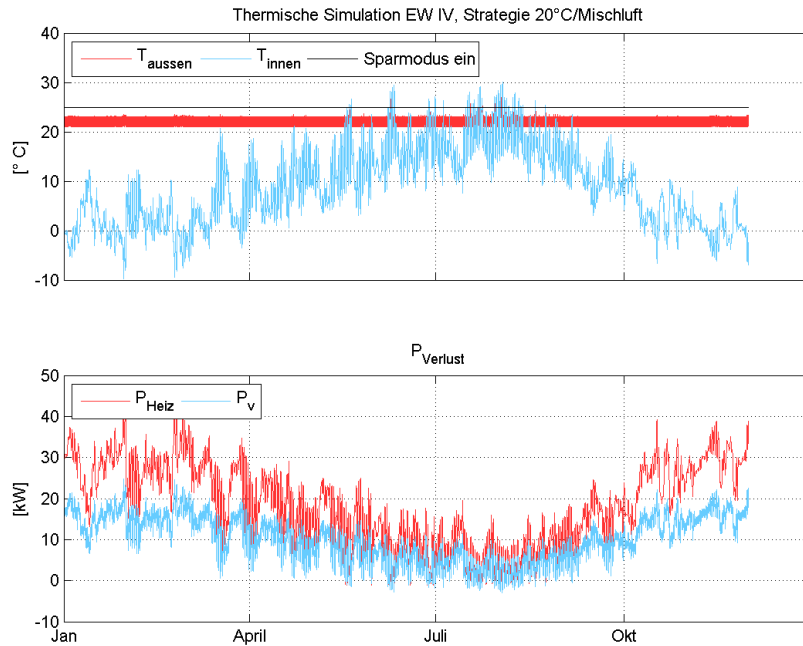


3.3 Simulation für EW IV

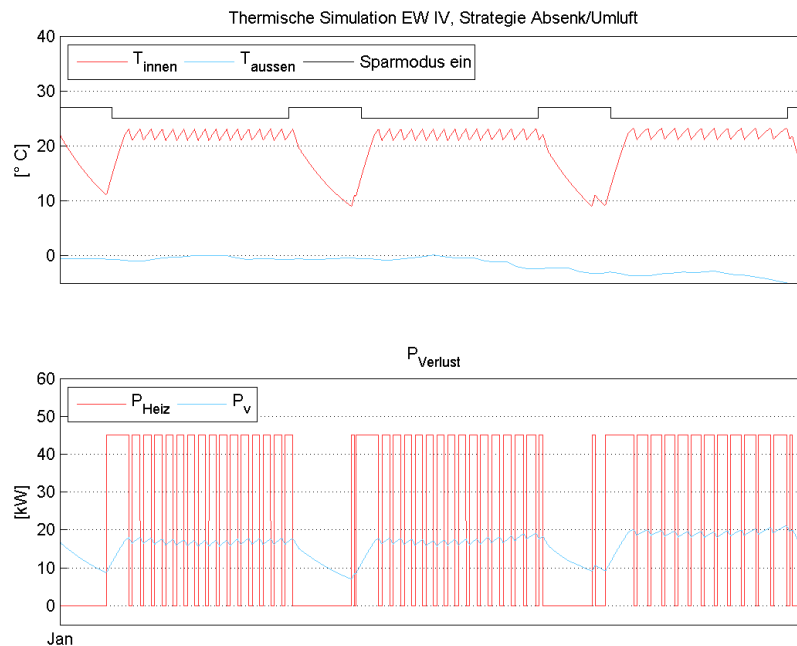
Zur Ermittlung des Heizenergieverbrauchs wurde das thermische Modell mit einer Schrittweite von 10 Sekunden für den Zeitraum Januar – Dezember 2004 simuliert. In der *Referenzsituation* wird die Fahrzeug-Innentemperatur vom Thermostaten durchgängig auf die aus der oben dargestellten Kennlinie bestimmten Temperatur geregelt und es wird mit permanentem Mischluftbetrieb mit einer Aussenluftzufuhr von 1700 m³/h gerechnet.

Im folgenden Bild sind die Zeitverläufe der Innen- und Aussentemperatur (oben) sowie der Wärmeverlust und die Heizleistung (unten) für die Referenzsituation für das gesamte Jahr 2004 dargestellt. Weil die Innentemperatur innerhalb der Hysterese variiert, erscheint der rote Verlauf als breite Linie. Die Differenz zwischen der Heizleistung und der Wärmeableitung entsteht durch den Mischluftbetrieb.

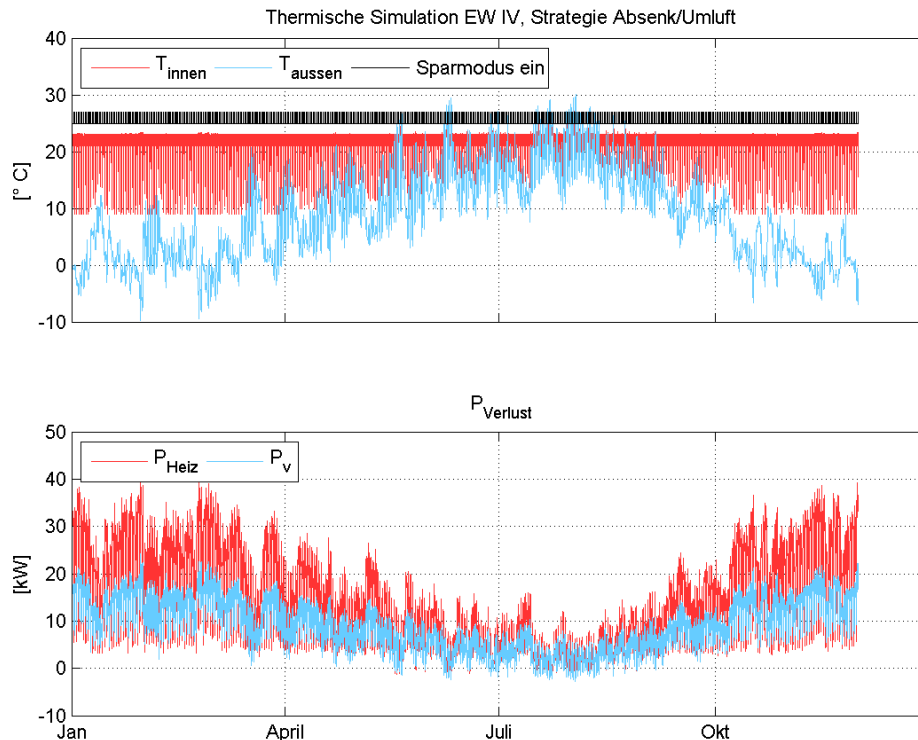
Gemäss Simulation beträgt die Heizenergie (d.h. der Wärmefluss vom Wageninnern an die Umgebungsluft sowie Erwärmung der Frischluft) über die ganze Zeitdauer 160'513 kWh pro Wagen, was einer mittleren Heizleistung von 18 kW entspricht.



Für die Simulation des *Heizsparmodus mit Umluftbetrieb* wird zwischen 23:00 h und 04:00 h der Sparmodus aktiviert und der Sollwert der Innenraumtemperatur auf 10° C reduziert. Während der übrigen Zeit ist der Sollwert gleich wie in der Referenzsituation von der Aussenlufttemperatur abhängig. Das folgende Bild zeigt den Effekt des Sparmodus zwischen dem 1. und 4. Januar 2004. Im oberen Diagramm ist der Verlauf der Fahrzeug-Innentemperatur (rot) und der Aussenlufttemperatur (hellblau) dargestellt. Das schwarze Signal zeigt an, wann der Heizsparmodus aktiv ist. Im unteren Diagramm ist die Heizleistung (rot) und die Wärmeableitung an die Umgebungsluft (hellblau) dargestellt. Deutlich sichtbar sind die Abkühlung des Fahrzeugs im Sparmodus und der Anstieg bei Aktivierung des Normalmodus. Beide Vorgänge folgen den exponentiellen Erwärmungs- und Abkühlungskurven, welche durch die Fahrzeugparameter definiert sind. Die intervallartige Heizleistung ist verursacht durch die Zweipunkt-Regelung. Die Energieeinsparung entsteht durch die reduzierte Differenz zwischen Innen- und Aussen­temperatur während der Sparphase (dreieckförmige Senken im Wärmeverlust) und dem dadurch reduzierten Wärmeabfluss sowie durch den Umluftbetrieb, bei welchem keine kalte Frischluft eingeblasen und aufgeheizt werden muss.



Das folgende Bild zeigt die Situation mit Heizsparmodes für das ganze Jahr 2004. Deutlich erkennbar ist die während des Sparmodes absinkende Innentemperatur. Im Sommer sinkt die Temperatur nicht mehr so weit ab wie im Winter.



Die Simulation ergibt für den Heizsparmodes mit reduzierter Innentemperatur und Umluftbetrieb einen totalen Heizenergieverbrauch von 134'295 kWh pro Wagen.

Diskussion der Ergebnisse

- Die Einführung des Heizsparmodes zwischen 23:00 h und 04:00 h reduziert die benötigte Heizenergie pro Wagen und Jahr um ca. 26 MWh von 160'513 kWh auf 134'295 kWh. Dies ist in der gleichen Grössenordnung wie der Erfahrungswert der RhB (24 MWh pro Wagen und Jahr).

Fahrzeug	Heizenergie 20 °C	Heizenergie mit Heizsparmodes	Einsparung pro Jahr	Einsparung pro Wagen und Jahr
EW IV	160'513 kWh	134'295 kWh	26'218 kWh	CHF 2'490

- SBB Trassenmanagement geht bei der Verrechnung der Energiekosten für die Konditionierung der Reisezugwagen von 9.3 Stunden Parkstellung pro Tag und einer mittleren Leistung von 16.9 kW aus. Die angenommenen 5 Stunden sind deshalb konservativ gerechnet.
- Mit dem verrechneten Preis von 9.5 Rp / kWh ergibt sich pro Wagen und Jahr eine Einsparung von CHF 2'490. Auf die gesamte Flotte hochgerechnet ergeben sich ca. CHF 1'200'000 p.a.

Typ	Anzahl Wagen	Verbrauch "heute" /Fz/Jahr [kWh]	Verbrauch "optimiert" /Fz/Jahr [kWh]	Einsparung /Fz/Jahr [kWh]	Einsparung /Fz/Jahr [CHF]	Einsparung Flotte /Jahr [CHF]
EW IV	335	160'513	134'295	26'218	2'490	834'000
IC Bt	90	160'513	134'295	26'218	2'490	224'000
EC	54	160'513	134'295	26'218	2'490	135'000
Total	479					1'193'000

3.4 Sparmodus Klimatisierung

Analog zum Sparmodus im Heizbetrieb ist auch ein Sparmodus bei der Klimatisierung sinnvoll: Bei parkierten Zügen kann eine erhöhte Innentemperatur zugelassen werden. Erst auf den Einsatzzeitpunkt wird der Sollwert gemäss der in Abschnitt 3.2 dargestellten Kennlinie zurückgesetzt. Für die Abschätzung der Wirkung des Klimasparmodus gelten folgende Einflussfaktoren:

- Aussentemperatur, ist bekannt an den Messstellen Meteoschweiz
- Luftfeuchtigkeit, Messdaten liegen nicht vor
- Sonneneinstrahlung, ist abhängig vom Standort des Fahrzeugs und hat grossen Einfluss auf die lokale Aussenlufttemperatur und Erwärmung des Wagens. Die entsprechenden Daten sind nicht bekannt.
- Zeitdauer Parkstellung während des Tages, ist nicht bekannt, es ist allenfalls eine Abschätzung möglich.
- Wirkungsgrad der Klimaanlage, welcher abhängig vom Anlagentyp und Arbeitspunkt ist.

Da viele dieser Einflussgrössen nicht mit der benötigten Genauigkeit bekannt sind kann der Effekt des Klima-Sparmodus nicht vernünftig genau abgeschätzt werden. Klar ist jedoch, dass auch der Sparmodus bei Klimatisierung den Energieverbrauch reduziert.

Auf den modernen Fahrzeugflotten IC 2000, ICN, DTZ, Flirt ist die Klimaanlage in Parkstellung ausgeschaltet und es wird Frischluft ins Fahrzeuginnere geblasen, falls die Innentemperatur einen Grenzwert überschreitet (typisch ca. 24 °C). Beim Verlassen des Sparmodus (über Schaltuhr oder Besetzen des Führerstandes) wird im Umluftbetrieb gekühlt (oder geheizt), um die gewünschte Temperatur möglichst schnell zu erreichen. Diese Strategie ist aus energetischer Sicht vernünftig.

4 Beurteilung und Empfehlungen

- Es wird empfohlen, den Heizsparbetrieb bei EW IV und verwandten Fahrzeugreihen weiter zu verfolgen.
- Im Jahr 2005 betrugen die Energiekosten von SBB Personenverkehr ca. CHF 140 Mio. Das abgeschätzte Einsparpotential von CHF 1.2 Mio p.a. entspricht damit knapp 1 %.
- Das grösste technische Hindernis ist die fehlende Kommunikation im Zugverband. Grundsätzlich ist eine Lösung wie bei der RhB über die UIC-Leitung denkbar. Abzuklären sind auch die Möglichkeiten auf den Klimarechnern selbst (zusätzlicher Signaleingang). Zudem müssen Stellmotoren und Klappen für den Umluftbetrieb installiert und angesteuert werden.
- Nimmt man Umrüstkosten von CHF 2'000 pro Wagen an, beträgt der Payback etwa 1 Jahr.
- Bei EW I / II dürften die Verhältnisse ähnlich sein; deren thermischen Kennwerte sind allerdings nicht bekannt, so dass keine aussagekräftige Simulation möglich ist. Für diese Wagen müssen allerdings die Restlebensdauer und deren geplante Einsatzkonzepte in die Entscheidung einbezogen werden.
- Ein Sparbetrieb für die Klimaanlage ist bei modernen Fahrzeugflotten implementiert. Bei EW IV / EC / IC Bt ist ebenfalls Potential vorhanden, die Quantifizierung ist allerdings schwierig, da viele nicht quantifizierbare Einflussgrössen existieren. Das Thema sollte zusammen mit dem Heizsparbetrieb betrachtet werden.

Weitere Massnahmen sind denkbar:

- Durchführung von thermografischen Messungen zur Ortung von Wärmebrücken und Nachrüstung beim Retrofit von Fahrzeugen.
- Verwendung von energieeffizienten Geräten und Optimierung des Frostschutzes (nur kritische Komponenten heizen und speziell isolieren) bei neuen Fahrzeugen oder Retrofit-Projekten.
- Konsequentes Schliessen von Fenstern und Türen bei parkierten Zügen. Das Reinigungs- und Rangierpersonal muss entsprechend sensibilisiert werden. Das zugehörige Potential ist nicht abschätzbar.

5 Literatur

- [1] M. Meyer, S. Menth, M. Lerjen: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB: Schlussbericht zum BFE-Projekt 101826 / 152247 (Projektlaufzeit 1.9.2006 – 30.9.2007).
- [2] S. Menth, M. Meyer: Energieeffizienz SBB: Bestandesaufnahme und Massnahmenübersicht. *emkamatik*-Dokument 06-0149, Version 1 vom 4.12.2006.
- [3] UIC: Energy efficiency technologies for railways. www.railway-energy.org
- [4] M. Müri: Ausbildung Glacier-Express-Panoramawagen 2005: Kapitel 8.1 Heizsparbetrieb. RhB-Dokument vom 16.5.2007.

Versionsinformation

--	24.9.2007	StM	---
1	4.10.2007	StM	Ergänzungen zur Klimatisierung nach Review
2	10.12.2007	StM	Ergänzungen; Ref. [1] bezieht sich auf BFE-Schlussbericht statt Dok. 07-0203

© 2007 *emkamatik* GmbH, Wettingen. Dieses Dokument oder Informationen daraus dürfen ohne unsere ausdrückliche Erlaubnis nicht an Dritte weitergegeben werden.

Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB:

Fahrweise, Zugsteuerung und Fahrplangestaltung

Informationen zu diesem Dokument

Das vorliegende Dokument ist Teil des Schlussberichts zu der von *emkamatik* GmbH durchgeführten Studie „Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB“ [1]. Es zeigt den Einfluss der Fahrweise auf den Energieverbrauch und enthält eine Schätzung, wie gross das Sparpotential bei der durch den Lokführer beeinflussbaren Fahrweise, durch Vorgaben der Zugsteuerung (Betriebsleitung) und bei der Fahrplangestaltung ist.

1 Ausgangslage

1.1 Heutige Situation bei den SBB

Das SBB-Netz ist eines der am dichtesten befahrenen Eisenbahnnetze der Welt und bereits vielerorts nahe an der Kapazitätsgrenze. Dies äussert sich darin, dass die Zugfahrpläne bereits heute in den grossen Knoten mit einer Auflösung von 6 Sekunden und mit wenig oder ohne Reserven geplant werden, und dass in Einzelfällen gar „theoretisch unfahrbar“ Fahrpläne existieren. Mit diesen Rahmenbedingungen bleibt vermeintlich nur wenig Spielraum, um auch noch Anliegen der Energieeffizienz zu berücksichtigen.

Andererseits zeigt eine Analyse der Fahrpläne, dass viele Zugläufe durchaus Reserven enthalten, die im ungestörten Betrieb zur Optimierung des Energieverbrauchs eingesetzt werden können. Gerade im System des Taktfahrplans wird ein nennenswerter Teil der Verkehrsleistung (Brutto-Tonnenkilometer) ausserhalb der Verkehrsspitzen, aber mit den gleichen vorgegebenen Fahrzeiten gefahren wie die Leistungen zur Spitzenzeit. Die dadurch verfügbaren zeitlichen Toleranzen sollen für eine energieoptimale Fahrweise genutzt werden.

1.2 Prioritäten bei der Fahrweise

Energieeffizienz ist nur einer von verschiedenen Faktoren, der bei der Bestimmung der Fahrweise berücksichtigt werden müssen. Die Prioritäten sind und bleiben unverändert:

1. Sicherheit
2. Pünktlichkeit
3. Wirtschaftlichkeit

Der Aspekt der Sicherheit liegt ausserhalb des Fokus dieser Studie. Er ist durch die gegebenen Daten für Strecken und Geschwindigkeitsreihen sowie die Fahrzeuge mit ihren zugelassenen Lasten, Zug- und Bremskräften implizit enthalten. Bei den folgenden Betrachtungen geht es somit darum, eine energieoptimale, der Situation im SBB-Netz angepasste Fahrweise zu ermitteln, die keine negativen Auswirkungen auf die Pünktlichkeit hat, und daraus das gegenüber heute vermutete Energiesparpotential abzuleiten.

2 Herleitung einer optimalen Fahrweise

2.1 Grundlagen

Der Energiebedarf einer Zugfahrt ergibt sich als integrale Grösse über die zurückgelegte Zeit aus folgenden Beiträgen:

- Überwindung der Höhendifferenz (mit positivem oder negativem Vorzeichen)
- Beschleunigung und Abbremsen des Zuges

- Überwindung des Fahrwiderstands des Zuges (v.a. Rollwiderstand, Lagerreibung, Luftwiderstand)
- Energieaufnahme mechanischer Bremsen oder elektrischer, nicht-regenerativer Bremssysteme (z.B. Widerstandsbremse, bei den SBB nicht relevant)
- Verluste im Antriebsstrang der Lokomotive oder des Triebwagens, einschliesslich der benötigten Hilfsbetriebeleistung (z.B. Kühlung)

Nicht alle Anteile stehen für eine Energieoptimierung der Fahrweise zur Verfügung. Die Höhendifferenz ist gegeben. Die Geschwindigkeit ist ebenfalls durch die verlangte Fahrzeit und damit durch den Fahrplan in gewissen Grenzen fixiert, vorhandene Reserven können aber für eine energiesparende Fahrweise ausgenutzt werden. Dies kann direkt geschehen (Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeit) oder indirekt, durch geringere Beschleunigung oder Verzögerung. Genau hier ist also der Ansatzpunkt für die Definition einer optimalen Fahrweise.

2.2 Energiesparende Fahrweise bei der DB AG

Bei der Deutschen Bahn (DB AG) gibt es seit einigen Jahren ein Projekt, das sich der energiesparenden Fahrweise widmet [2]. Es hat nennenswerte Erfolge gebracht und wird immer wieder breit publiziert. Nach unserer Kenntnis werden dabei, teilweise mit technischer Unterstützung, für den Lokführer folgende Regeln geschult:

- Volle Beschleunigung
- Beharrungsfahrt mit zugelassener Geschwindigkeit
- Ausrollphase ohne Antriebsleistung
- Bremsen

Dies entspricht der Fahrweise, wie sie seit den 1950er Jahren z.B. für Metros oder Nahverkehrszüge, insbesondere bei Gleichstromspeisung, angewendet wird. Obwohl DB Energie GmbH für rückgespeiste Energie nur zwischen 30 und 70 % der Kosten für aufgenommene Energie vergütet, werden auch bei der DB AG die Lokführer anhand der Nettoenergiebilanz (Aufnahme minus Rückspeisung) beurteilt, wie dies aus Umweltaspekten auch sinnvoll ist. Die korrekte Berücksichtigung der Antriebsverluste wird nicht speziell geschult. Letzteres kann jedoch eine erhebliche Rolle spielen, wie unten anhand eines Beispiels gezeigt wird.

Die genannten Regeln sind aus zwei Gründen auf dem SBB-Netz nicht ohne weiteres anwendbar:

- In hügeligem Gelände kann eine zur Unzeit eingeleitete Ausrollphase sofort eine markante Auswirkung auf die Geschwindigkeit und damit die Fahrzeit und Streckenkapazität haben.
- Im Knotenzulauf darf eine Ausrollphase ebenfalls nicht einfach am Schluss der Strecke erfolgen, da sonst die Gefahr besteht, dass in kurzem Abstand nachfolgende Züge behindert werden, also z.B. ein Warnung zeigendes Signal sehen. Dies erhöht nicht nur den Energieverbrauch des nachfolgenden Zuges (für die Wiederbeschleunigung nach einer abrupten Bremsphase), sondern wirkt sich auch empfindlich auf die Streckenkapazität aus.

2.3 Theoretisches Optimum

Das theoretisch erreichbare Optimum der Fahrweise bei gegebener Strecke, Zugdaten und Fahrzeit wurde im Rahmen eines Projekts der damaligen Firma Adtranz ermittelt und ebenfalls publiziert [3]. Die Untersuchungen fanden statt im Hinblick auf ein System zur Unterstützung des Lokführers in energieoptimierter Fahrweise, das aber in dieser Form bisher nicht realisiert wurde. Auf einem ICN der SBB wurde auf der Strecke Zürich HB – St. Gallen ein Demonstrator vorgeführt, unter anderem auch vor Vertretern von SBB Infrastruktur und Personenverkehr. Die optimale Fahrweise wird dabei von einem mathematischen Algorithmus berechnet, der das Erreichen des theoretischen Optimums tatsächlich garantieren kann. Lediglich eine kleine, durch die Weg- und Arbeitspunktdiskretisierung bedingte Abweichung bleibt. Vorgegeben wird die verlangte Fahrzeit für eine bestimmte Strecke, und die verfügbare Zeitreserve wird möglichst gleichmässig entlang der Strecke verteilt. Dieses Vorgehen wurde damals auch von den Infrastruktur-Vertretern ausdrücklich begrüsst, da es der Maximierung der Streckenkapazität entgegen kommt.

Als Ergebnis entsteht eine Fahrweise ohne ausgeprägte Phasen mit Beschleunigung und Verzögerung (ausgenommen bei Sollgeschwindigkeitsänderungen), sondern mit eher parabelförmigen Verläufen. Auf die kürzest mögliche Form gebracht sind die Erkenntnisse:

- Fahrzeit geht bei tiefen Geschwindigkeiten verloren
- Energie geht bei hohen Geschwindigkeiten und hohen Leistungen verloren.

2.4 Vorgehen im Rahmen dieser Studie

Ziel dieser Studie war es nicht, eine neue Fahrweise zu entwickeln, sondern aus bestehenden Informationen eine Fahrweise abzuleiten, die

- zu einem möglichst kleinen Energieverbrauch führt
- vom Lokführer in der Praxis ohne aufwendige technische Hilfsmittel anwendbar ist
- zu keiner Verminderung der Streckenkapazität führt

Dazu verwenden wir insbesondere die Erkenntnisse über das theoretische Optimum. Da dieses Optimum aber nicht ohne weiteres zu leicht merkbaren Regeln für die Bedienung führt, passen wir die Fahrweise entsprechend an. Mit Hilfe unserer Simulationstools lassen sich die Auswirkungen sowohl auf die Fahrzeit als auch auf den Energiebedarf genau quantifizieren und z.B. die Effekte unterschiedlicher Bremsbedienung studieren.

Es folgen zunächst einige Beispiele. Anschliessend werden die Regeln für die optimale Fahrweise im SBB-Netz zusammengefasst.

2.5 Bewertung der zurückgespeisten Energie

Bei der Bewertung der rekuperierten Energie gehen wir von einer 100-prozentigen Nutzbarkeit aus. Dies kommt der realen Situation im SBB-Netz am nächsten, denn

- In jedem Wechselstrom-Bahnnetz wird die Energie von einem bremsenden Zug immer abgenommen. Ist dies nicht der Fall, bricht das gesamte Netz sofort wegen Überfrequenz zusammen. Dies ist in der Praxis aber extrem selten (z.B. Netzzusammenbruch im Tessin am 22.6.2005, einzelne Fälle in Inselnetzen bei spezieller Speisekonfiguration bei den Österreichischen Bundesbahnen ÖBB).
- Die Energieeinsparung durch Rückspeisung könnte also nur durch erhöhte Verluste im Übertragungsnetz vermindert werden. Dies wäre bei schwach befahrenen Netzen mit langen Übertragungswegen der Fall. Bei den SBB trifft das nicht zu. Dank rekuperierender Züge kann die Energie meistens direkt zwischen den Zügen ausgetauscht werden, so dass die Übertragungsverluste gesamthaft konstant bleiben oder sogar sinken.

Obwohl diese Bewertung mit der Fahrweise direkt nichts zu tun hat, ist sie doch eine sehr wichtige Randbedingung dafür.

3 Beispiele für die Fahrweise

3.1 Anhalten aus Streckengeschwindigkeit

Folgend Annahmen liegen dem Beispiel zugrunde.

- Strecke Luzern – Rotkreuz
- Zug: IC2000 (Re 460 + 8 Wagen)
- Kommerzieller Halt in Rotkreuz aus 140 km/h

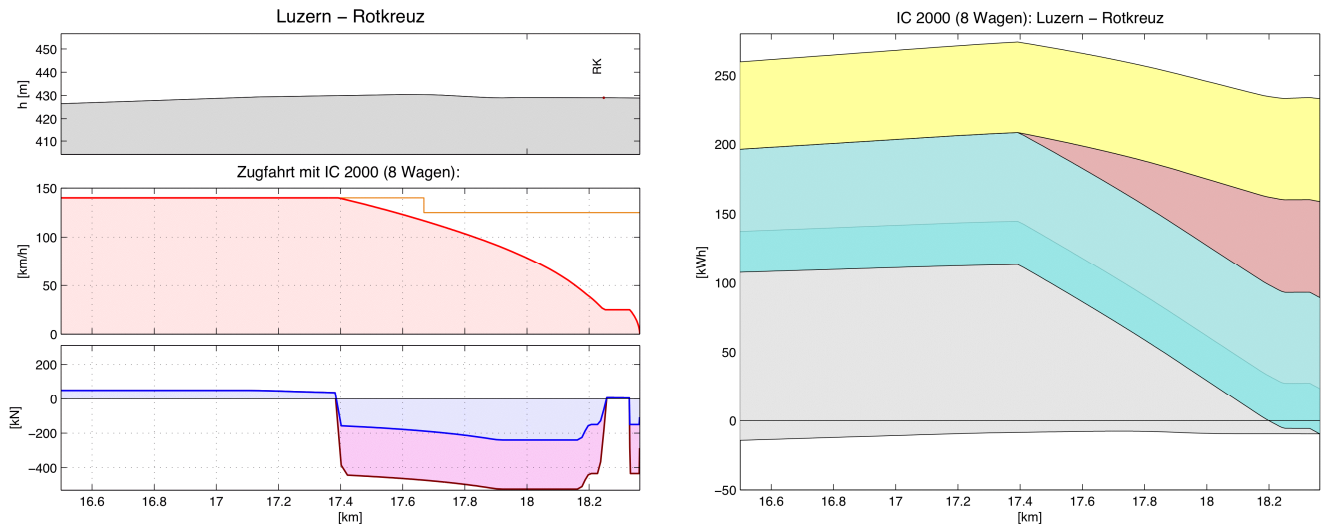
Verglichen werden zwei verschiedene Fahrweisen, die fahrzeitgleich sind:

- Variante 1: kombiniert elektrische und pneumatische Bremsung, einmaliges Lösen der Bremse am Perron
- Variante 2: nur elektrische Bremsung aus Streckengeschwindigkeit, präziser Zielhalt unter Zuhilfenahme der pneumatischen Bremse

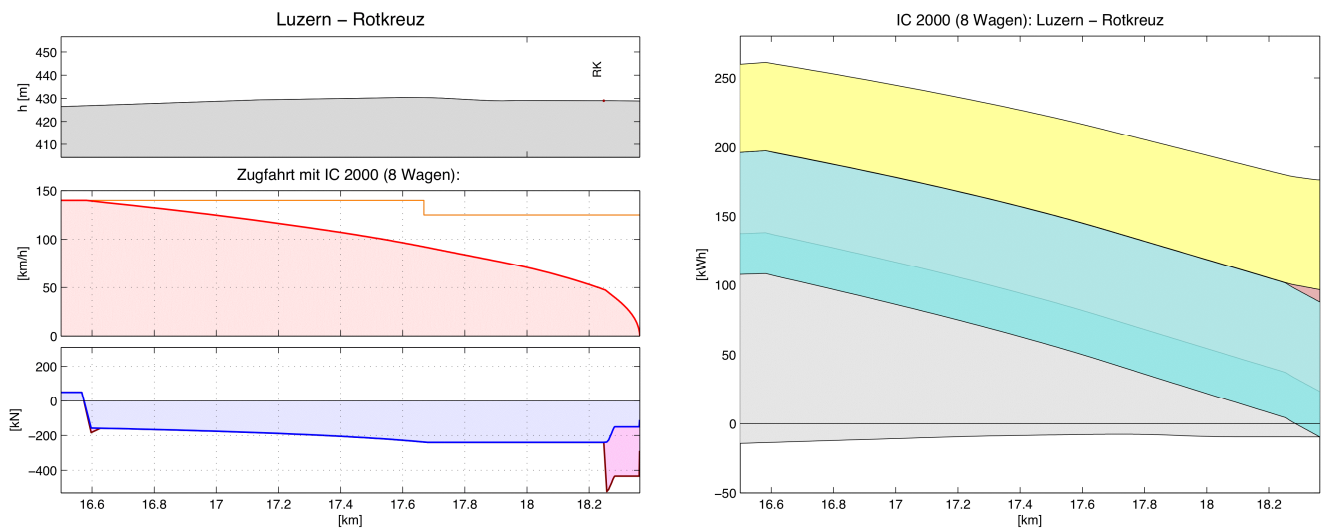
Variante 2 führt, obwohl fahrzeitgleich, mit nur 177 statt 234 kWh für die ganze Strecke Luzern – Rotkreuz zu einem um rund 24 % tieferen Energieverbrauch. Es bestätigt sich die oben formulierte Regel, wonach Fahrzeit bei tiefen und Energie bei hohen Geschwindigkeiten und Leistungen verloren geht, wenn man sie nicht durch möglichst ausschliesslich elektrische Bremsung zurückspeist. Bei tiefen Geschwindigkeiten ist der Einsatz der mechanischen Bremsen dagegen energiemässig kaum von Nachteil, hilft aber Fahrzeit sparen. In Realität wird der Lokführer bei tiefen Geschwindigkeiten die pneumatische Bremse zusätzlich einsetzen, um den präzisen Halteort zu definieren (in der Simulation nicht dargestellt).

Die folgenden Figuren zeigen die Verläufe beider Varianten im Vergleich.

Variante 1:



Variante 2:



Die Fahrweise nach Variante 2 wurde auch mit Vertretern der Infrastruktur (ETCS, Betriebsführung) besprochen. Es zeigt sich, dass sie nicht im Widerspruch zu einer hohen Streckenkapazität steht, sofern die vorgegebenen Fahrzeiten damit eingehalten werden können. Ein zu abruptes Abbremsen vor einer Geschwindigkeitsreduktion führt vielmehr zu einer Singularität (Ausreisser nach oben) bei der möglichen Zugfolgezeit. Auch die bei ETCS vorgesehenen Bremskurven sind so gelegt, dass zumindest bei trockenem Wetter die Bremsung bei allen modernen Zügen ausschliesslich mit der elektrischen Bremse durchgeführt werden können.

Die Erkenntnis, dass die elektrische Bremse massiv zur Reduktion des Nettoenergieverbrauchs beiträgt, ist nicht neu. Das gezeigte Beispiel soll vor allem die grosse Sensitivität bei den tatsächlichen Werten aufzeigen. Es zeigt auch, wie präzise die Schulung sein muss, damit der Lokführer innerhalb der ihm zugestandenen Toleranzen zu einem minimalen Energieverbrauch beitragen kann.

3.2 Ausnutzung der Topographie

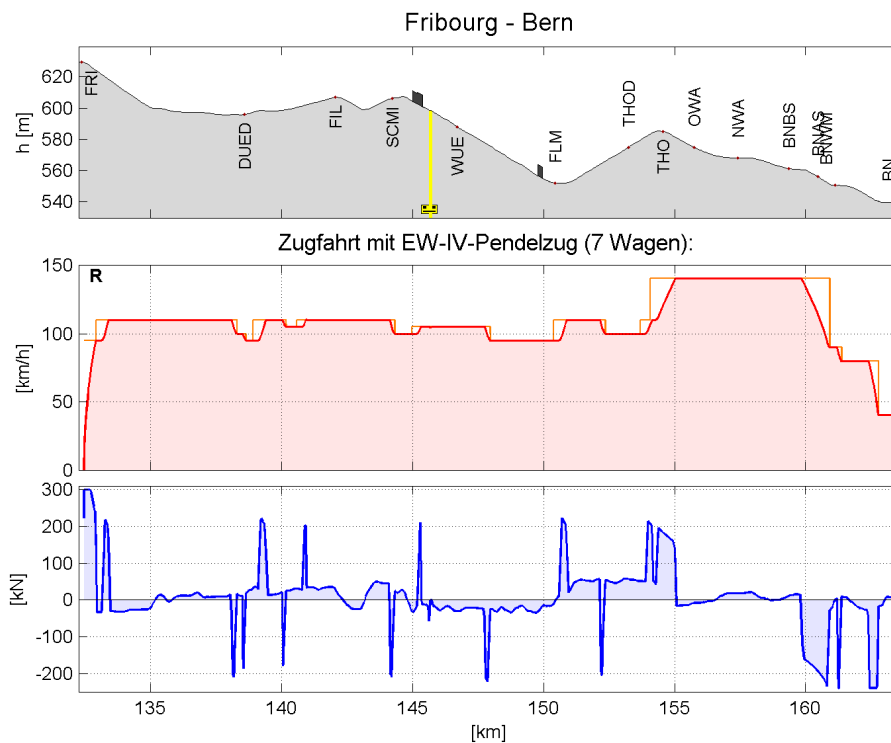
Folgend Annahmen liegen dem Beispiel zugrunde:

- Strecke: Fribourg – Bern
- Zug: EW-IV-Pendelzug (Re 460 + 7 Wagen)
- wechselnde Maximalgeschwindigkeiten, wechselnde Topographie
- nur elektrische Bremse berücksichtigt

Drei Varianten der Fahrweise werden gezeigt. Jede ist anwendbar z.B. bei einer gegebenen, kürzeren oder längeren Fahrzeit des Zuges.

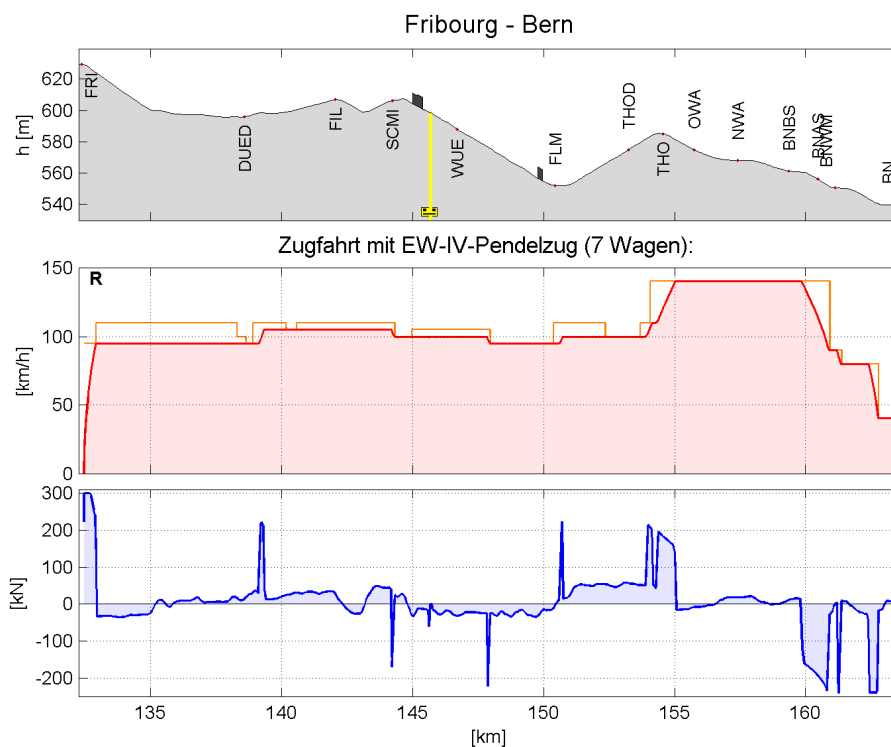
Variante 1: schnellstmögliche Fahrweise ohne mechanische Bremsen:

- Fahrzeit Fribourg – Bern: 18'49" (Fahrplan: 22'00")
- Energieverbrauch: 150 kWh



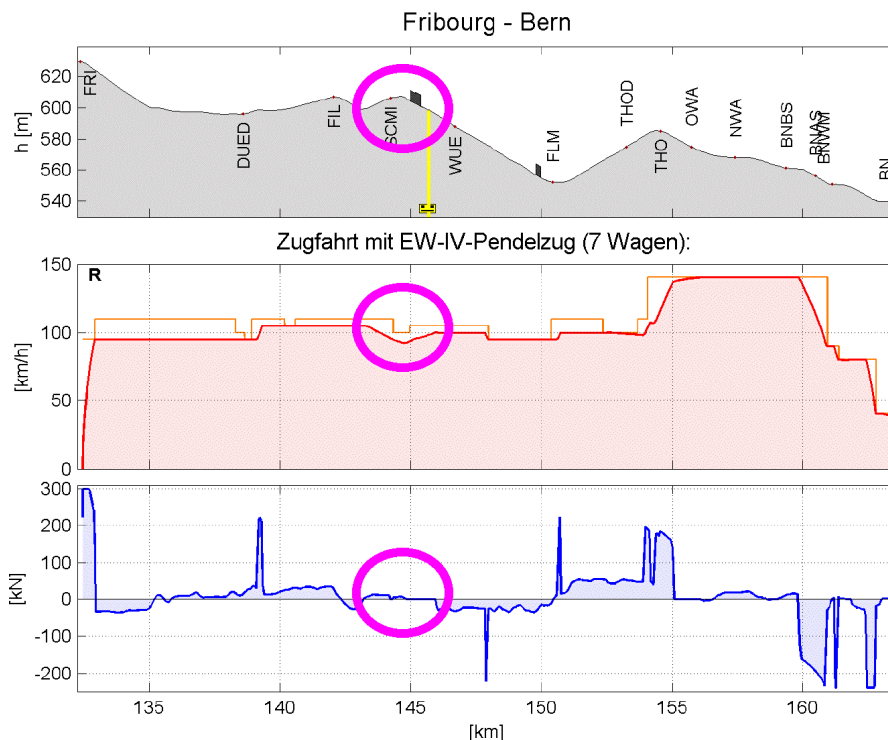
Variante 2: kurze Erhöhungen der Maximalgeschwindigkeit nicht ausfahren:

- Fahrzeit Fribourg – Bern: 19'30" (+ 3.7 % gegenüber Variante 1)
- 142 kWh (– 5.6 % gegenüber Variante 1)



Variante 3: zusätzlich Topographie ausnützen:

- Fahrzeit Fribourg – Bern: 19'37" (+ 4.3 % gegenüber Variante 1)
- 140 kWh (– 6.7 % gegenüber Variante 1)



Auch diese Fahrweise ist nicht neu und wird von vielen Lokführern gepflegt. Es zeigt sich aber deutlich, dass die Sensitivität Fahrzeit gegen Energie kleiner ist als beim richtigen Einsatz der Bremsen.

3.3 Berücksichtigung der Antriebsverluste

Die Antriebsverluste in einem Lokomotivantrieb oder einem Triebzug sind stark vom Arbeitspunkt abhängig. So steigen die Verluste des Transformators beispielsweise quadratisch mit der übertragenen Leistung. Dies führt dazu, dass der Wirkungsgrad des Antriebs gewöhnlich nicht bei maximaler Beschleunigung optimal ist.

Anhand der Fahrt eines FLIRT auf der Stadtbahn Zug (Abschnitt Luzern – Zug, ein Weg mit praktisch gleicher Höhenlage in diesen beiden Stationen) soll der Effekt gezeigt werden. Der FLIRT hat eine grosse Traktions- und elektrische Bremsleistung und braucht diese zwingend nur im Stossverkehr oder bei verspäteten Zügen. Es ergeben sich folgende Werte:

Fahr-/Bremsleistung am Rad	Reine Fahrzeit	Spezifischer Verbrauch
100 % (2600 kW)	1288 s (100 %)	43.1 Wh/tkm (100 %)
90 %	1304 s (101.2 %)	40.5 Wh/tkm (94.0 %)
80 %	1325 s (102.9 %)	38.0 Wh/tkm (88.2 %)
70 %	1353 s (105.0 %)	35.3 Wh/tkm (81.9 %)

Zum Vergleich: die Fahrzeit nach Fahrplan beträgt 31 Minuten, netto (ohne angenommene Haltezeiten von je 45 Sekunden bzw. 90 Sekunden in Rotkreuz) also 1365 Sekunden.

Für Verkehrsarten, bei denen die Antriebsverluste einen grossen Teil des Nettoenergiekonsums ausmachen, lohnt sich also auch die sorgfältige Betrachtung der entsprechenden Abhängigkeiten.

3.4 Folgerungen

Folgende Erkenntnisse ergeben sich aus den gezeigten Beispielen:

- Eine gute und konsequente Bremsbedienung ist absolut zentral.
- Pünktliches Fahren unterstützt Energieeffizienz, indem die Toleranzen und Zeitreserven für die energiesparende Fahrweise eingesetzt werden können.
- Bei richtiger Schulung entstehen keine Konflikte mit der Trassenkapazität.

Daraus können entsprechende Handlungsempfehlungen für den Lokführer abgeleitet werden, die z.B. wie folgt aussehen können:

- Sofortiges Abfahren, volle Beschleunigung bis ca. 100 km/h
- Präziser Zielhalt
- Mechanische Bremsen möglichst nur bei tiefen Geschwindigkeiten
- Exakte Einhaltung von Geschwindigkeitsschwellen bei tieferen Geschwindigkeiten
- Im Rahmen der verfügbaren zeitlichen Toleranz: Ausnutzung Geländeprofil
- Im Rahmen der verfügbaren zeitlichen Toleranz: „Glätten“ V-Profil bei höheren Geschwindigkeiten

Für die Umsetzung dieser Massnahmen wird die detaillierte Ausarbeitung eines Schulungsprogramms empfohlen, das diese Fahrweise unterstützt, fahrzeugspezifische Anweisungen dazu gibt und den Handlungsspielraum des Lokführers gegenüber demjenigen der Betriebsführung möglichst genau abgrenzt.

4 Möglichkeiten der Zugsteuerung

4.1 Allgemeines

Von Seiten der Zugsteuerung kann der Energieverbrauch vor allem dadurch optimiert werden, dass unnötige Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge oder Halte verhindert werden. Das Problem besteht oft darin, dass der Triebfahrzeugführer von seinem Führerstand aus nur eine beschränkte Sicht der Gesamtsituation hat, und dadurch nicht optimal fahren kann, weil ihm nicht alle notwendigen Randbedingungen bekannt sind. Im Gegensatz dazu haben die Betriebsleitzentralen (BLZ) und Fernsteuerzentren (FSZ) die Übersicht über die Gesamtsituation und können entsprechende Dispositionen treffen.

4.2 Heutige Situation

Die Information der Triebfahrzeugführer über die aktuelle Zuglage erfolgt heute nicht flächendeckend und systematisch. In verschiedenen Gesprächen mit Betroffenen (Triebfahrzeugführer, BLZ, Fahrdienstleiter) zeigten sich folgende Themen:

- Es existiert keine eindeutige Verantwortungszuweisung für die Information der Triebfahrzeugführer. Sowohl BLZ wie FSZ nehmen diese Aufgabe teilweise wahr oder nicht wahr.
- Ressourcenprobleme: Im ruhigen Normalbetrieb, wenn wenig Konflikte bestehen, wären in den Leitstellen die Ressourcen vorhanden, um auch die Triebfahrzeugführer zu informieren. Es besteht dann aber wenig Bedarf dafür, da kaum ungeplante Halte stattfinden. In Störungs- und Hochbetriebssituationen, wenn auch die meisten Konflikte auftreten, die eine Information der Triebfahrzeugführer erfordern würden, sind die Mitarbeiter mit der Disposition und dem Störungsmanagement soweit ausgelastet, dass für die Information weiterer Triebfahrzeugführer keine Zeit bleibt.
- Es gibt bereits heute starke regionale Unterschiede, wie diese Aufgaben wahrgenommen werden. Einzelne Fernsteuerzentren wurden mehrfach positiv erwähnt (z.B. Brugg oder Erstfeld), dass sie sehr oft diese „Zusatzinformationen“ an die Triebfahrzeugführer liefern, während andere dies offensichtlich fast nie tun.
- Die modernen technischen Mittel zur Information der Triebfahrzeugführer haben die Kommunikation wider erwarten nicht erleichtert. Beispiel: Früher mit dem einfachen „Gotthardfunk“ war es auf den ausgerüsteten Strecken und Fahrzeugen sozusagen per Knopfdruck möglich mit einem Triebfahrzeugführer zu sprechen, gleichzeitig bekamen mithörende Triebfahrzeugführer „gratis“ Informationen über die Zuglage, die ihnen halfen, ein Gesamtbild zu bekommen. Heute mit GSM-R / ZFK 88 / VZFK 90 braucht es oft mehrere Anläufe, bis die Verbindung zustande kommt. Ist die Verbindung hergestellt, erreicht die Information nur den beabsichtigten Adressaten (Punkt-zu-Punkt-Verbindung, keine passive Information anderer durch Mithören). Der freie Netzzugang führt zudem dazu, dass

bedeutende Anteile des Güterverkehrs durch Dritt-EVU erbracht werden, deren Triebfahrzeugführer ebenfalls oft nur schwer zu erreichen sind. Die Kommunikation mittels SMS hat Latenzzeiten von bis zu mehreren Minuten, so dass die Information oft erst ankommt, wenn sie bereits irrelevant ist.

- Die BLZ / FSZ stellen fest, dass die Triebfahrzeugführer kein einheitliches Verhalten zeigen. Die Triebfahrzeugführer sind aus ihrer Sicht zu wenig berechenbar, was es erschwert, die richtigen dispositiven Entscheide zu fällen.

4.3 Folgerungen

Es ist darauf hinzuwirken, dass dem Triebfahrzeugführer die notwendigen Informationen über seine „Nähere Umgebung“ („Was ist vor meinem Zug, was ist hinter meinem Zug?“) zugänglich gemacht werden, die es ihm erlauben, innerhalb dieses Rahmens seine Fahrweise möglichst optimal zu gestalten. Gleichzeitig muss dieses optimale Verhalten der Triebfahrzeugführer einheitlich geschult werden, so dass ein reproduzierbares Verhalten der verschiedenen Triebfahrzeugführer aus sich der BLZ / FSZ entsteht.

Folgende Massnahmen werden empfohlen:

- Unterstützung aller Kommunikations-Massnahmen, welche es erlauben, dass die Betriebsführung die Lokführer über die aktuelle Betriebssituation und insbesondere über ihren eigenen Zug orientiert. Weitere Ausbauten der Kommunikationssysteme sind voranzutreiben und hinsichtlich der Einfachheit der Handhabung („Kontaktaufnahme per Knopfdruck“) und der allgemeinen Anwendbarkeit (Alle Triebfahrzeugführer im Netz sind auf dem gleichen Weg erreichbar) zu optimieren.
- Berücksichtigung des Energieaspekts bei den laufenden oder beantragten Projekten wie LEA 2, Coproduktion, PULS 90, Pünktlich Fahren im Kernnetz etc. Diese Projekte stehen nicht im Widerspruch zu einem energieeffizienten Bahnbetrieb; es ist also lediglich wichtig, dass dieser begleitend zu diesen Projekten den entsprechenden Stellenwert einnimmt und entsprechender Handlungsspielraum, sofern vorhanden, erkannt und sinnvoll genutzt wird.
- Ausarbeitung eines detaillierten Schulungsprogramms für die Mitarbeiter der BLZ/FSZ und Triebfahrzeugführer, das die Zusammenhänge zwischen Energie, Fahrweise, Zugsteuerung und der Kommunikation aufzeigt, konkrete Handlungsanweisungen gibt und klare, reproduzierbare Spielregeln zwischen BLZ, FSZ und Triebfahrzeugführern festlegt.

5 Fahrplangestaltung

Der Fahrplan im Netz der SBB ist durch das engmaschige Netz mit vielen Zwangspunkten, die grossen Verkehrsströme, das Knotenprinzip im Personenverkehr und den gemischten Betrieb auf fast allen Linien (Fern- und S-Bahnverkehr, Güterverkehr) gegeben und einer Optimierung im Hinblick auf Energieaspekte kaum zugänglich.

In beschränktem Rahmen kann lediglich die Fahrzeitreserve an sinnvolle Orte im Netz gelegt werden, sofern überhaupt Spielraum besteht. Aus Energiesicht soll die Anordnung von Reservezeiten an folgenden Orten Priorität haben:

- Hohe Fahrgeschwindigkeiten
- Fahrt durch längere Tunnel mit mittleren oder höheren Geschwindigkeiten
- Streckenabschnitte mit kurzen Haltestellenabständen und kurzen Fahrzeiten

6 Sparpotential im SBB-Netz

6.1 Methode der Hochrechnung

Um das heute im SBB-Netz noch vorhandene Sparpotential durch Fahrweise und Zugsteuerung zu ermitteln, ist ein Vergleich zwischen dem Istzustand und einem Ziel notwendig. Als Ziel kann für den gegebenen Fahrplan beispielsweise gelten, dass alle Lokführer optimal fahren und dass kein Zug mehr durch unerwartete Signalstellung abbremsen oder zum Halt gebracht werden muss.

Eine systematische Auswertung aus Messungen ist uns nur aus [4] bekannt (Strecke Luzern – Zürich HB mit IC 2000 aus dem Jahre 2000). Damals wurde ein Sparpotential von maximal 20 % ermittelt für Züge im Zulauf auf einen Bahnknoten, für Züge in der Gegenrichtung entsprechend weniger. Eine Wiederholung einer derartigen Auswertung aus Einzelzugfahrten wurde im Rahmen der Studie erwogen, jedoch aus Kapazitätsgründen (auch bei SBB) und wegen Mängeln neuer Software auf den Re 460 und ICN nicht weiter

verfolgt. Diese Mängel (im Zusammenhang mit der Geschwindigkeitsbestimmung für ETCS) hätten die Resultate vermutlich verfälscht.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Zielsituation durch Simulation zu ermitteln und den Istzustand aus Messungen. Dieser Weg wurde für die vorliegende Studie gewählt.

6.2 Referenzfahrweise

Im Hinblick auf die Hochrechnung wurde eine grössere Anzahl Betriebsfälle und eine „Referenzfahrweise“ festgelegt. Diese entspricht den Regeln, wie sie für eine energiesparende Fahrweise im SBB-Netz ermittelt wurde. Sie führt zur kürzest möglichen Fahrzeit, die mit einer restriktiven Anwendung der mechanischen Bremsen überhaupt erreichbar ist. Die simulierten Fahrzeiten liegen damit (grob) um rund 5 % unter den Fahrplanzeiten (Fernverkehr) bzw. nur knapp unter den Fahrplanzeiten (Regionalverkehr).

Dies heisst, dass im normalen Betrieb

- Der Energieverbrauch gegenüber dieser Referenzfahrweise um nicht mehr als etwa 5 % unterschritten werden kann (Ausnutzung der Topographie, reduzierte Beschleunigung und Geschwindigkeiten bei hohen Geschwindigkeiten). Dies ist jedoch nur bei pünktlichem Verkehr der Fall.
- Der Energieverbrauch gegenüber dieser steigt, sobald der Lokführer ungeschickt fährt, oder der Zug verspätet ist.

Die Referenzfahrweise stellt damit einen zu erwartenden Mittelwert bei sorgfältiger Betriebsführung dar. Zudem liegt ihr Verbrauch am „Knickpunkt“ zwischen hoher Sensitivität Energie gegen Fahrzeit (Anwendung der mechanischen Bremsen) und tiefer Sensitivität (Ausnutzung der Topographie, etc.).

Als weitere Randbedingungen gelten: trockenes Wetter, Halte gemäss Fahrplan, langlaufende Güterzüge mit zwei bis drei Zwischenhalten. ICN, FLIRT, GTW und Re 450 ganz ohne mechanische Bremsen, Re 4/4 II im Reiseverkehr pneumatische Bremsung nur unter 90 km/h, Re 460 unter 50 km/h, Güterzüge unter 70 km/h.

6.3 Potentialabschätzung

Aus den diversen, in [5] tabellarisch dargestellten Simulationen für typische Zugläufe im SBB-Netz ergibt sich unter Anwendung der Referenzfahrweise für jede Triebfahrzeugflotte und jede Einsatzart ein spezifischer Verbrauch. Dieser liegt unter demjenigen, der von den SBB im Hinblick auf die Energiekostenaufteilung ermittelt wurde, z.B.:

- ICN: ca. 20.5 Wh/tkm (Simulation) gegenüber 23.2 Wh/tkm (Langzeit-Messung)
- Re 460: ca. 20.0 Wh/tkm (Simulation gegenüber 22.0 Wh/tkm (Langzeit-Messung)
- Im Regionalverkehr (NPZ, FLIRT) liegt die Situation ähnlich, wenn auch die Unsicherheit bei der Hochrechnung der Simulationen (Betriebsmix) etwas grösser ist.
- Im Güterverkehr ist aufgrund der grossen Streuung der Zugarten und –lasten sowie aufgrund fehlender statistischer Auswertungen über eine grössere Zeit und Anzahl Messungen keine genaue Aussage möglich.

Dort wo genügend genaue Daten vorliegen, zeigt sich dass die Realität und die heutige Betriebssituation um nur etwa 10 % auseinander liegen. Das heisst, dass ohne grössere Eingriffe in das Netz, den Fahrplan und die Fahrzeugflotte der Verbrauch durch die Fahrweise und Zugsteuerung gemeinsam um höchstens 10 % gesenkt werden kann. Genauere Aussagen lassen sich daraus nicht ableiten, die Grössenordnung stimmt aber mit den Werten aus [4] überein. Im Sinne einer konservativen Schätzung geben wir deshalb folgendes Einsparpotential an:

- Fahrweise (energieoptimale Fahrweise durch den Lokführer im Rahmen der ihm zugestandenen zeitlichen Toleranzen): rund 3 bis 5 %. Dieses Potential kann durch Schulung kurz- bis mittelfristig erschlossen werden.
- Betriebsführung (Orientierung der Lokführer über die aktuelle Betriebssituation und entsprechende Einschränkungen): etwa 1 bis 2 %. Dieses Potential kann vor allem mittelfristig erschlossen werden, da dazu die entsprechenden Kommunikationsmittel flächendeckend verfügbar sein müssen.
- Automatische Zugsteuerung (mit Hilfe von technischen Massnahmen, zur weitgehenden Verhinderung von konfliktbedingten Geschwindigkeitseinschränkungen und Halten): etwa 2 bis 5 %. Dieses Potential kann nur langfristig erschlossen werden, da es umfassende neue Betriebsleitsysteme bedingt, die vor allem aus Kapazitätsgründen nötig werden.

Alle Prozentwerte beruhen auf einer bestmöglichen Schätzung aufgrund des dargelegten Vorgehens.

7 Literatur

- [1] M. Meyer, S. Menth, M. Lerjen: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB: Schlussbericht zum BFE-Projekt 101826 / 152247 (Projektlaufzeit 1.9.2006 – 30.9.2007).
- [2] H. Lehmann: Energiesparende Fahrweise bei der Deutschen Bahn. Elektrische Bahnen 6/2007, S. 397 – 402
- [3] M. Meyer, R. Prem, R. Franke: Der „Driving Style Manager“ für pünktlichen und energiesparsamen Bahnbetrieb. Schweizer Eisenbahn-Revue, Eisenbahn-Revue International und Eisenbahn Österreich 3/2002
- [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. Meyer: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB: Betriebliche Massnahmen auf Triebfahrzeugen. *emkamatik*-Dokument 07-0205, Version 1 vom 1.10.2007

Versionsinformation

--	1.10.2007	MM	---
1	13.12.2007	MM	Ergänzung zu DB; Ref. [1] bezieht sich auf BFE-Schlussbericht statt Dok. 07-0203

© 2007 *emkamatik* GmbH, Wettingen. Dieses Dokument oder Informationen daraus dürfen ohne unsere ausdrückliche Erlaubnis nicht an Dritte weitergegeben werden.

Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB:

Energieversorgung

Information zu diesem Dokument

Das vorliegende Dokument ist Teil des Schlussberichts zu der von *emkamatik* GmbH durchgeführten Studie „Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB“ [1]. Es behandelt die Massnahmen im Bereich Energieversorgung, die zur Reduktion des Energiebedarfs getroffen werden können.

1 Einleitung

Im Allgemeinen wird der Elektrische Energieverbrauch der Traktion nur auf die am Stromabnehmer des Fahrzeuges bezogene Energie und die Optimierung des Energieverbrauchs auf Fahrzeuginterne Massnahmen bezogen.

Ein Triebfahrzeug ist aber immer Teil eines Gesamtsystems, und es ergibt sich bei einer Gesamtbetrachtung zusätzliches Energieeffizienz-Potential in Produktion, Umformung und Transport der elektrischen Energie zum Fahrzeug. Dieses Dokument zeigt mögliche Massnahmen in diesem Bereich auf.

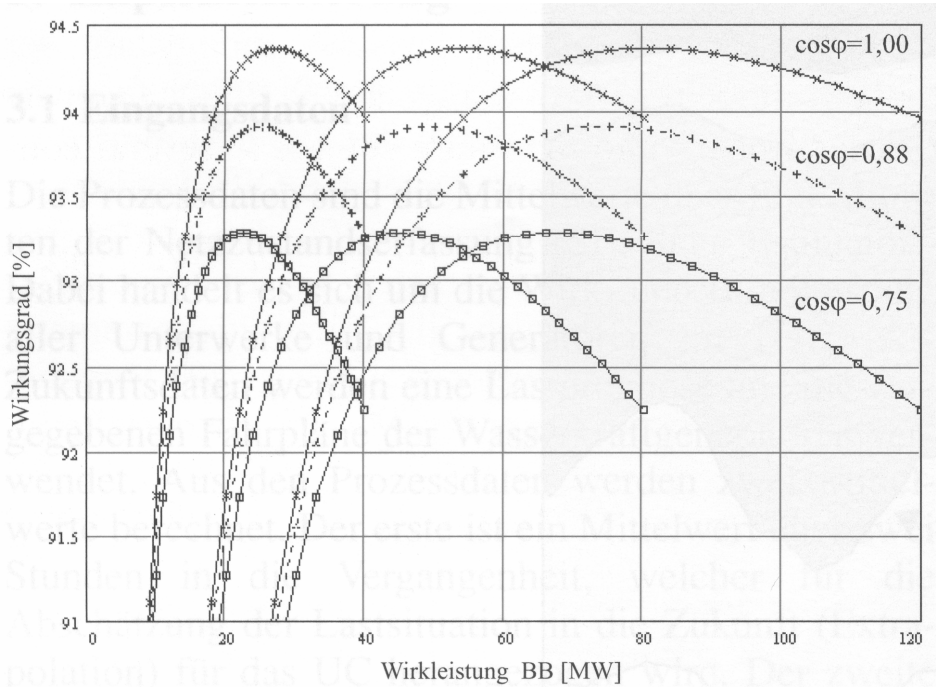
2 Maschineneinsatz

Ein Teil der Energieversorgung der SBB wird durch Fremdbezug aus dem 50-Hz-Landesnetz gedeckt. Die Energie muss dazu mittels Umformer- oder Umrichterwerken ins 16.7-Hz-Bahnetz übertragen werden. Das Schweizer Bahnnetz ist über 12 rotierende Umformersätze und über 6 statische Umrichter mit dem Landesnetz verbunden (inkl. Anlage Wimmis).

2.1 Umformer

Bei der Umformung der elektrischen Energie treten naturgemäss Verluste auf. Diese sind für rotierende Umformer einerseits abhängig vom Leistungsfaktor und andererseits von der übertragenen Wirkleistung.

Die folgende Grafik zeigt Beispielhaft den Wirkungsgrad für ein Umformerwerk mit drei Umformersätzen zu 40 MW in Abhängigkeit von übertragener Wirkleistung, Leistungsfaktor sowie für 1, 2 oder 3 Umformersätze. (Daten aus Österreich, [2])



Werden in diesem Beispiel 30 MW bei einem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0.88$ übertragen, so ergeben sich in Abhängigkeit des Maschineneinsatzes folgende Verluste:

Umformersätze	Wirkungsgrad [%]	Verlustleistung [kW]
1	93.8	1860
2	93.15	2055
3	91.4	2580

Die Zahlen dürften für die Schweizer Umformerwerke (jeweils skaliert mit den entsprechenden Nennleistungen) in vergleichbaren Grössenordnungen liegen.

Die 12 Umformersätze in der Schweiz haben zusammen eine Nennleistung von 464 MVA.

Eine Wirkungsgradverbesserung von 1 % entspricht bei Betrieb aller Umformersätze mit halber Nennleistung einer Verlustleistung von 2320 kW.

Kann **beispielsweise** während einer Stunde pro Tag durch optimierten Maschineneinsatz eine Wirkungsgradverbesserung von 1 % erzielt werden, so ergibt sich ein **Einsparpotential** von:

$$1 \text{ h} \times 2320 \text{ kW} \times 365 \text{ d} = \text{ca. } 845'000 \text{ kWh pro Jahr.}$$

Das in der Praxis realisierbare Einsparpotential ist schwierig abzuschätzen, da der Maschineneinsatz auch von weiteren Kriterien wie Lastsituation, Regelreserve, Optimierung der Anzahl Schalthandlungen resp. der Anfahr-/Abschaltvorgänge sowie der Energiebezugsüberwachung abhängt. Ein entsprechender Optimierungsalgorithmus ist deshalb komplex. Eine entsprechende Implementation wurde bei den Österreichischen Bundesbahnen Ende der 90er-Jahre bei der Erneuerung der Netzregelung realisiert und ist in [2] detailliert beschrieben.

Es scheint empfehlenswert, diese Situation für das Schweizer Bahnnetz genauer zu analysieren.

2.2 Umrichter

Neben den rotierenden Umformern werden in neuerer Zeit vermehrt statische Umrichter zur Energieübertragung aus dem Landesnetz ins Bahnnetz eingesetzt. Die neueste solche Anlage in der Schweiz steht in Wimmis. Sie weist folgende Kennzahlen auf:

Leistungsbilanz für einen Umrichterblock, inkl. Hilfsbetriebe (aus [3]):

Last	Verlustleistung [kW]
Vollast	538
Leerlauf	78

Last	Wirkungsgrad [%]
100 %	97.3
50 %	97.9
> 17 %	> 97
> 10 %	> 95

Wird angenommen, dass die Wirkungsgrade der Schweizer Umformerwerke vergleichbar denjenigen der Österreichischen Bundesbahnen sind (siehe vorhergehendes Kapitel), so zeigt sich, dass die Umrichter-anlage inkl. Hilfsbetriebe selbst bei 10% Last einen besseren Wirkungsgrad hat als eine Umformeranlage im besten Arbeitspunkt.

Der Einsatz von statischen Umrichtern ist deshalb aus Sicht der Energieeffizienz dem Einsatz von rotierenden Umformern vorzuziehen.

Beispiel 1:

Anlage Wimmis, 25 MW Übertragung vom Landesnetz ins Bahnnetz ($\cos \varphi = 1$):

	Angenommener Wirkungsgrad	Verlustleistung [kW]
Umformer (1 Satz à 25 MW)	94 %	1500
Umrichter (2 Blöcke à 20 MW)	97.5 %	625

Kann als Annahme jeden Tag während 8 Stunden 25 MW mit den statischen Umrichtern statt dem Umformer übertragen werden, ergibt sich ein **Einsparpotential** von:

$$8 \text{ h} \times 875 \text{ kW} \times 365 \text{ d} = \mathbf{2'555'000 \text{ kWh pro Jahr}}$$

Beispiel 2:

Hypothetische Anlage, Umformer Nennleistung 60 MW, Vergleich mit drei Umrichterblöcken vom Typ Wimmis à 20 MW Nennleistung. Übertragung von 60 MW aus dem Landesnetz ins Bahnnetz ($\cos \varphi = 0.88$):

	Angenommener Wirkungsgrad	Verlustleistung [kW]
Umformer (1 Satz à 60 MW)	93.3 %	4020
Umrichter (3 Blöcke à 20 MW)	97.3 %	1620

Kann als Annahme jeden Tag während 8 Stunden 60 MW mit den statischen Umrichtern statt dem Umformer übertragen werden, ergibt sich ein **Einsparpotential** von:

$$8 \text{ h} \times 2400 \text{ kW} \times 365 \text{ d} = \mathbf{ca. 7'000'000 \text{ kWh pro Jahr}}$$

3 Energietransport über lange Distanzen

Die Energieerzeugung und der Energie Ein- und Verkauf der SBB wird von der Zentralen Leitstelle (ZLS) von SBB Energie in Zollikofen gesteuert. Soweit bekannt gibt es dabei keine speziellen Algorithmen, die die Energieübertragung systematisch optimieren. Vieles beruht auf der Erfahrung der Operateure, die durch ihre Bedienhandlung versuchen, das Gesamtnetz optimal zu führen.

Bei der Energieübertragung entstehen beachtliche Verluste, die zudem mit zunehmender Auslastung der Leitungen zunehmen. Diese könnten durch eine angepasste Produktion (jeweils möglichst Nahe am Verbrauch) optimiert werden.

Beispiel 1:

- Leitungslänge: 100 km
- Leitungsbelag: 102.8 mOhm/km (Schleifenwiderstand 2-schleifig)
- Übertragene Leistung: 30 MW (@ 132 kV = 227 A)

So ergeben sich Verluste von:

$$100 \text{ km} \times 0.1028 \text{ Ohm/km} \times (227 \text{ A})^2 = 530 \text{ kW} = \text{ca. } 1.8 \% \text{ der übertragenen Leistung}$$

Beispiel 2:

Dieselbe Übertragungsleitung wie im Beispiel 1, jedoch bereits mit 50 MW vorbelastet. Es sollen zusätzlich 30 MW übertragen werden:

- Leitungslänge: 100 km
- Leitungsbelag: 102.8 mOhm/km (Schleifenwiderstand 2-schleifig)
- Vorbelastung: 50 MW (@ 132 kV = 379 A)
- Übertragene Leistung: 30 MW (@ 132 kV = 227 A)

So ergeben sich zusätzliche Verluste von:

$$\begin{aligned} 100 \text{ km} \times 0.1028 \text{ Ohm/km} \times (606 \text{ A})^2 &= 3775 \text{ kW} \\ - 100 \text{ km} \times 0.1028 \text{ Ohm/km} \times (379 \text{ A})^2 &= 1477 \text{ kW} \\ &= \text{ca. } 2300 \text{ kW} = \text{ca. } 7.7 \% \text{ der Übertragenen Leistung} \end{aligned}$$

Können während nur schon 2 Stunden pro Tag diese 30 MW durch lokale Produktion ersetzt werden, so ergibt sich für dieses Beispiel ein **Einsparpotential von**

$$2 \text{ h} \times 2300 \text{ kW} \times 365 \text{ d} = \text{ca. } 1'700'000 \text{ kWh pro Jahr}$$

Das Beispiel zeigt, dass es empfehlenswert ist, diese Situation für das Schweizer Bahnnetz genauer zu analysieren.

4 Kreisströme im 15-kV-Netz

Werden die Stufenschalter in zwei Unterwerken, die auf dieselbe Fahrleitung speisen, ungleich eingestellt, so ergibt sich aus der Spannungsdifferenz über der dazwischengeschalteten Fahrleitung ein Kreisstrom, der beim einen Unterwerk vom Hochspannungsnetz ins Fahrleitungsnetz eingespeist, und beim anderen Unterwerk wieder ins Hochspannungsnetz zurückgespeist wird. In der Fahrleitung führt dieser Kreisstrom zu entsprechenden Verlusten.

Beispiel 1:

Fliesst durch falsche Stufenschalterstellung bei sonst unbelasteter Fahrleitung ein Kreisstrom von 50 A:

- Fahrleitungslänge: 25 km
- Leitungsbelag: 100 mOhm/km (Typische Doppelspurfahrleitung)
- Kreisstrom: 50 A

So ergeben sich Verluste von:

$$25 \text{ km} \times 0.1 \text{ Ohm/km} \times (50 \text{ A})^2 = \text{ca. } 6 \text{ kW}$$

Beispiel 2:

Ist dieselbe Fahrleitung wie im Beispiel 1 bereits mit 300 A vorbelastet, und fliesst zusätzlich ein Kreisstrom von 50 A:

- Fahrleitungslänge: 25 km
- Leitungsbelag: 100 mOhm/km (Typische Doppelspurfahrleitung)
- Vorbelastung: 300 A
- Kreisstrom: 50 A

So ergeben sich zusätzliche Verluste von:

$$\begin{aligned} 25 \text{ km} \times 0.1 \text{ Ohm/km} \times (350 \text{ A})^2 &= 306 \text{ kW} \\ - 25 \text{ km} \times 0.1 \text{ Ohm/km} \times (300 \text{ A})^2 &= 225 \text{ kW} \\ &= \text{ca. } 81 \text{ kW} \end{aligned}$$

Ist dies täglich 2 Stunden der Fall, so ergibt sich **pro Fahrleitungsabschnitt** ein **Einsparpotential von**

$$2 \text{ h} \times 81 \text{ kW} \times 365 \text{ d} = \text{ca. } 60'000 \text{ kWh pro Jahr}$$

5 Spannungsabsenkung bei Schwachlast

5.1 Unterwerkstransformatoren

Energieverluste in Transformatoren werden unterschieden in Leerlaufverluste (Magnetisierungsverluste), die von der Spannung abhängen und somit auch im Leerlauf auftreten, und in Kurzschlussverluste (Kupferverluste), die Abhängig vom Strom sind.

Im SBB-Netz sind rund 130 Unterwerkstransformatoren eingebaut. Die Nenn-Leerlaufverluste aller Unterwerkstransformatoren zusammen betragen rund 1100 kW.

Kenndaten eines typischen Unterwerkstransformators:

Typ	Nennspannung Sekundär [kV]	Nennleistung [MVA]	Nenn-Leerlaufverluste [kW]	Nenn-Kupferverluste [kW]
MPVR 21800	16	21.8	9.08	143

Die Leerlaufverluste können durch Reduktion der Ausgangsspannung (mit dem primärseitigen Stufenschalter) reduziert werden. Dies lohnt sich jedoch nur, wenn der Transformator schwach belastet ist, da bei gleichbleibendem Leistungsbezug durch die reduzierte Spannung ein höherer Sekundärstrom bezogen wird, so dass die Kupferverluste sich erhöhen. Ein gleichbleibender Leistungsbezug ergibt sich bei fahrenden Triebfahrzeugen, entweder direkt (Umrichterfahrzeuge) oder indirekt durch die Handlungen des Lokomotivführers (Stufenschalterfahrzeuge).

Eine Energieeinsparung ist nur zu erreichen, wenn die Erhöhung der Kupferverluste geringer ausfällt als die Reduktion der Leerlaufverluste.

Spannungsabhängige Leerlaufverluste des MPVR 21800:

Spannung Sekundär [kV]	Leerlaufverluste [kW]
15.04	7.12
14.08	5.73

Die Reduktion der Fahrleitungsspannung von 16 auf 15 kV ergibt somit ein Einsparungspotential von rund 2 kW oder 22% bezogen auf die Nenn-Leerlaufverluste.

Können 2/3 aller Unterwerkstransformatoren jede Nacht während 6 Stunden von 16 auf 15 kV reduziert werden, so entspricht dies einem **Einsparpotential** von

$$2/3 \times 6 \text{ h} \times 0.22 \times 1100 \text{ kW} \times 365 \text{ d} = \text{ca. } 350'000 \text{ kWh pro Jahr}$$

5.2 Lokomotiven

Dieselben Überlegungen gelten für eingeschaltete Lokomotivtransformatoren. Bei Lokomotiven ohne Hilfsbetriebeumrichter wird durch die Spannungsreduktion zudem auch die Leistung der Ventilatormotoren an den Hilfsbetriebebewicklungen reduziert.

Fahrzeug	Nenn-Trafo- Leerlaufverluste [kW]	Nennleistung Ventilatormotoren (Stufe schwach) [kW]	Total [kW]
Re 4/4 II	3.9	17.8	21.7
Re 6/6	2.8	39.6	42.4

Als Näherung wird angenommen, dass sich die Leistungen und die Leerlaufverluste quadratisch mit der Spannung reduzieren

Bei einer Absenkung der Fahrleitungsspannung von 16 auf 15 kV ergeben sich für jede eingeschaltete Lokomotive:

Fahrzeug	Reduktion Trafo- Leerlaufverluste [kW]	Reduktion Leistung Ventilatormotoren (Stufe schwach) [kW]	Reduktion Total [kW]
Re 4/4 ^{II}	0.47	2.16	2.63
Re 6/6	0.34	4.80	5.14

Stufenschalterlokomotiven werden normalerweise ausgeschaltet abgestellt. Bei Frostgefahr wird allerdings als Schutzmassnahme angeordnet, dass die Triebfahrzeuge eingeschaltet abzustellen sind.

Annahmen:

- 20 Nächte pro Jahr
- 80 % der Flotten eingeschaltet = 70 Re 6/6 und 225 Re 4/4 ^{II/III}

Einsparpotential:

- Re 4/4 ^{II/III}: 20 Nächte x 225 Fahrzeuge x 6 h x 2.63 kW = ca. 71'000 kWh pro Jahr
- Re 6/6: 20 Nächte x 70 Fahrzeuge x 6 h x 5.14 kW = ca. 43'000 kWh pro Jahr
- **Total: ca. 114'000 kWh pro Jahr**

6 Literatur

- [1] M. Meyer, S. Menth, M. Lerjen: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB: Schlussbericht zum BFE-Projekt 101826 / 152247 (Projektlaufzeit 1.9.2006 – 30.9.2007).
- [2] M. Seiser, G. Wallnberger: Umformerwerksoptimierung – Momentanoptimierung im Bahnstromversorgungsnetz. Elektrotechnik und Informationstechnik 1/1999, S.72 - 80.
- [3] M. Thoma, U. Jampen: Statische Frequenzumrichteranlage Wimmis (Schweiz). Elektrische Bahnen 12/2006, S. 576 - 583.

Versionsinformation

--	24.9.2009	ML	---
1	13.12.2007	MM	Referenz [1] bezieht sich auf BFE-Schlussbericht statt Dokument 07-0203

© 2007 emkamatik GmbH, Wettingen. Dieses Dokument oder Informationen daraus dürfen ohne unsere ausdrückliche Erlaubnis nicht an Dritte weitergegeben werden.

Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB:

Beschreibung der Modelle und Rechentools

Informationen zu diesem Dokument

Das vorliegende Dokument ist Teil des Schlussberichts zu der von *emkamatik* GmbH durchgeführten Studie „Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB“ [1]. Es enthält die Beschreibung der Modelle und Rechentools, auf welche die Aussagen zum Energieverbrauch abgestützt sind.

1 Zweck der Modelle

Sehr viele der im Rahmen der Studie erarbeiteten Aussagen stützen sich auf die Simulation von Zugfahrten auf dem SBB-Netz. Insbesondere gilt dies für:

- Bewertung von technischen Massnahmen, deren Energiespareffekt abhängig ist vom Geschwindigkeits- und Zugkraftverlauf einer Fahrt (z.B. Optimierung der Umrichter-Zwischenkreisspannung)
- Einfluss der Fahrweise auf den Energiebedarf
- Ermittlung eines „Basisverbrauchs“ für die verschiedenen Zugkategorien (also eines Verbrauchs, der bei gegebenem Netz, Triebfahrzeugen und Betrieb kaum unterschritten werden kann), als Teil der Hochrechnung der Massnahmen auf das ganze SBB-Netz.

2 Rechentools „*emkaTrain*“ und „*emkasys-F*“

2.1 *emkaTrain*

Als Basis für alle Simulationen dienen die bereits vorhandenen Rechentools *emkaTrain* und *emkasys-F*. Beides sind Eigenentwicklungen und basieren auf MATLAB. *emkaTrain* ermöglicht die Definition von Triebfahrzeugen und Wagen, die Bildung von Zügen, die Definition von Streckenprofilen und die Durchführung und Auswertung von Zugfahrten über diese Strecken. *emkaTrain* wurde während der Studie teilweise weiterentwickelt, um die benötigten Simulationen (beispielsweise im Hinblick auf den Einfluss unterschiedlicher Fahrweise) durchführen zu können.

2.2 *emkasys-F*

emkasys-F behandelt Netze, Subsysteme und Komponenten im Frequenzbereich und dient der Berechnung von elektrischen Schaltungen unter korrekter Berücksichtigung von frequenzabhängigen Parametern. Für die Studie wurden damit die Verlustmodelle für die Antriebe der Triebfahrzeuge erzeugt. Die Teilmodelle für einige Triebfahrzeuge existierten bereits vor der Studie (beispielsweise von Störstromrechnungen für den FLIRT) und sind auch durch Messungen validiert. Die von *emkasys-F* erzeugten Zwischenergebnisse können an *emkaTrain* angebunden werden und stehen dann dort zur Verfügung.

Parallel zur Studie wurden Teile aus *emkasys-F* als Eigenleistung der Firma *emkamatik* GmbH weiterentwickelt (z.B. die präzise Berechnung von Stromrichterverlusten), siehe dazu auch den Arbeitsplan [2].

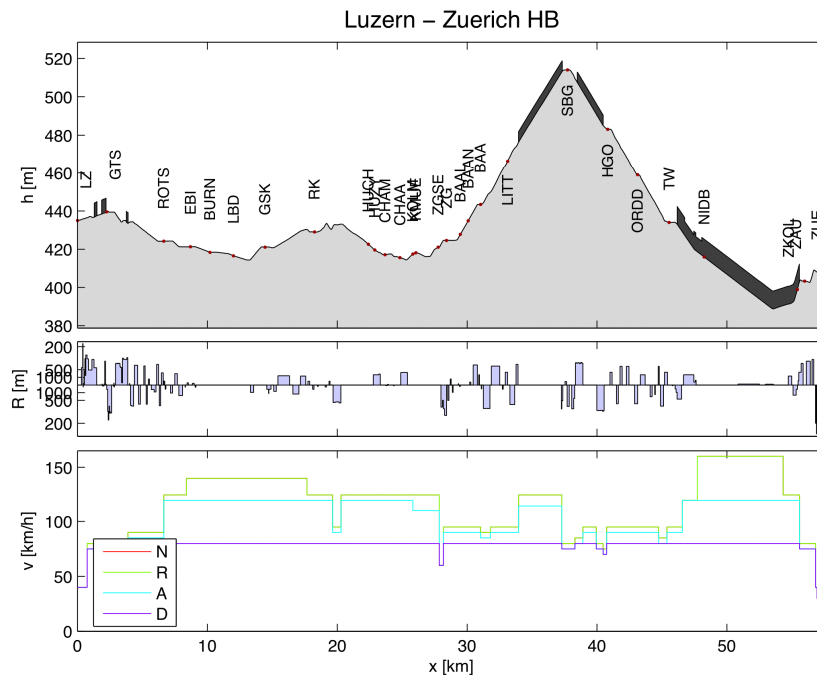
2.3 Ältere Modelle

Bereits in den Jahren 1993 bis 1997 wurden von Markus Meyer, damals Assistent an der Professur für Leistungselektronik und Messtechnik der ETH Zürich, diverse Untersuchungen zum Energiebedarf von elektrischen Lokomotiven durchgeführt [3]. Die damals verwendeten Rechenmodelle sind noch verfügbar und wurden für die Studie verwendet. Insbesondere die messtechnisch validierten Verlustmodelle für die Re 4/4 II und Re 6/6 sind unverändert im Einsatz, neu aber an *emkaTrain* angebunden.

3 Strecken

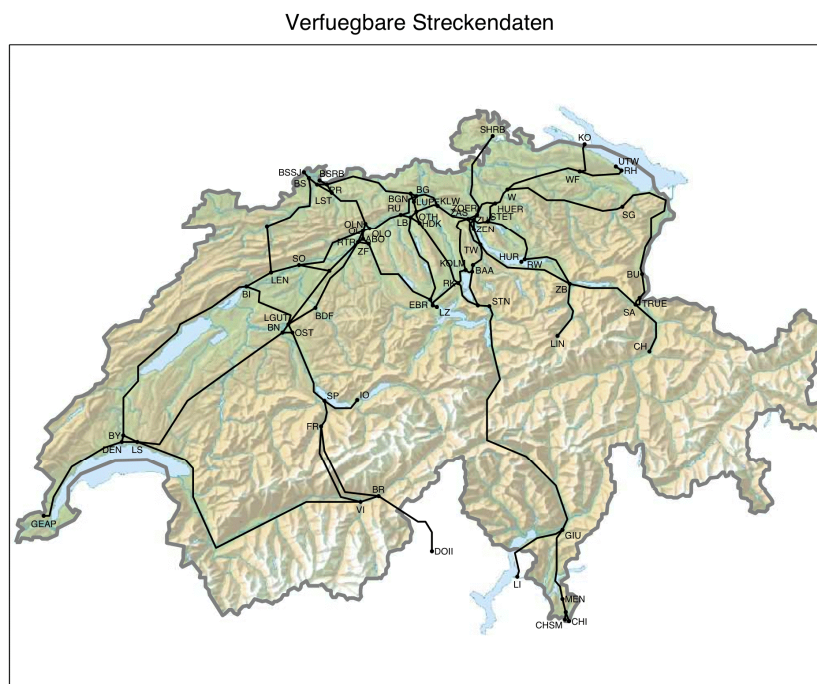
3.1 Modelle

Die Streckenmodelle bilden einzelne Streckenabschnitte aus dem SBB-Netz (oder jedem beliebigen anderen Netz) nach. Sie enthalten die Profile für die Höhe, Kurvenradien, Tunnelquerschnitte, zulässige Geschwindigkeiten (für verschiedene Geschwindigkeitsreihen) und Lage der Schutzstrecken gegen den Weg. Einzelne Abschnitte können einfach zusammengesetzt werden. Die folgende Figur zeigt ein Beispiel in der durch *emkaTrain* automatisch aus den Daten erstellten Darstellung.



3.2 Daten

Die für die Studie verfügbaren Abschnitte sind in der folgenden Karte eingetragen. Durch den Wechsel von einem auf mehrere andere Abschnitte in den Knotenbahnhöfen lassen sich die Streckendaten für fast alle wichtigen Zugläufe auf dem SBB-Hauptstreckennetz zusammenstellen.



Die notwendigen Datensätze wurden von Herrn U. Morf, SBB Infrastruktur, zur Verfügung gestellt. Sie bilden die betreffenden Abschnitte sehr präzise ab und werden bei den SBB auch für Fahrplanrechnungen verwendet. Dank der Übermittlung der Daten in Excel-Files konnten diese mit relativ geringem Aufwand in **emkaTrain** eingelesen und dort in die betreffenden Matlab-Objekte konvertiert werden.

4 Triebfahrzeuge

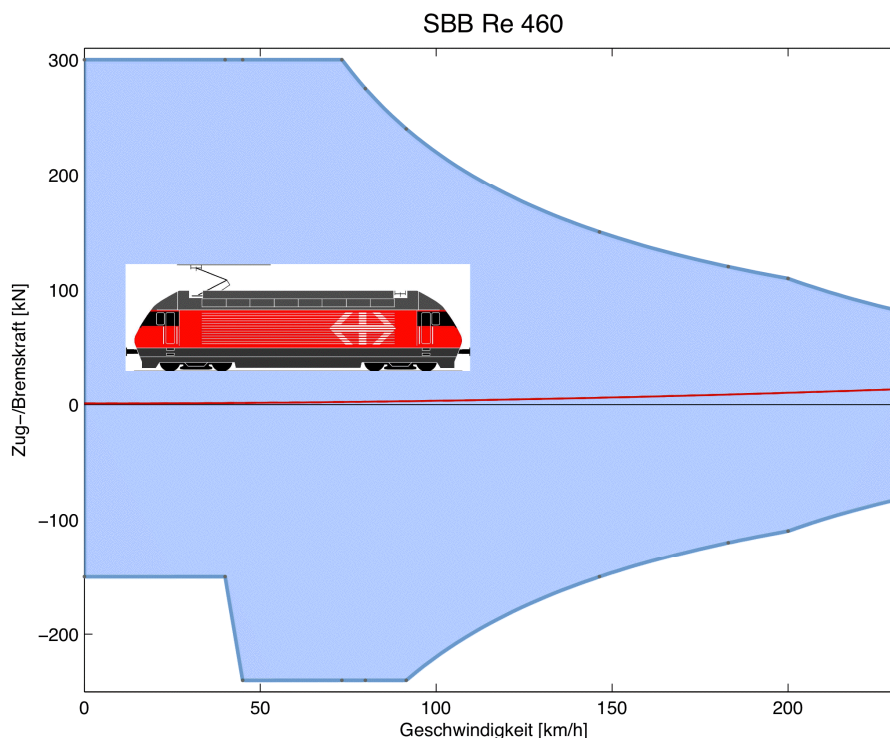
4.1 Hauptdaten

Von allen simulierten Triebfahrzeugen werden zunächst die Hauptdaten in die Modelle eingegeben. Es sind dies die Länge, Masse, der Zuschlagsfaktor für die rotierenden Massen sowie der Fahrwiderstand gegen die Geschwindigkeit. Für den Fahrwiderstand und für die rotierenden Massen stehen gewöhnlich keine genauen Angaben zur Verfügung. Die entsprechenden Werte sind deshalb bestmöglich geschätzt.

4.2 Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm

Das Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm bildet ab, wieviel Zug- und elektrische Bremskraft ein Triebfahrzeug bei jeder Geschwindigkeit aufbringen kann. Die äussere Umgrenzungslinie ist gewöhnlich aus Fahrzeugbeschreibungen oder Bedienerhandbüchern genau bekannt. Wichtig sind jedoch zusätzliche einsatzabhängige Beschränkungen, wie zum Beispiel die Begrenzung der Zug- und Bremskraft bei Doppeltraktion oder Unterschiede je nachdem, ob eine Lokomotive an der Zugspitze oder am Zugschluss läuft. Solche Einschränkungen lassen sich in **emkaTrain** programmieren und für jeden Simulationsfall entsprechend einstellen.

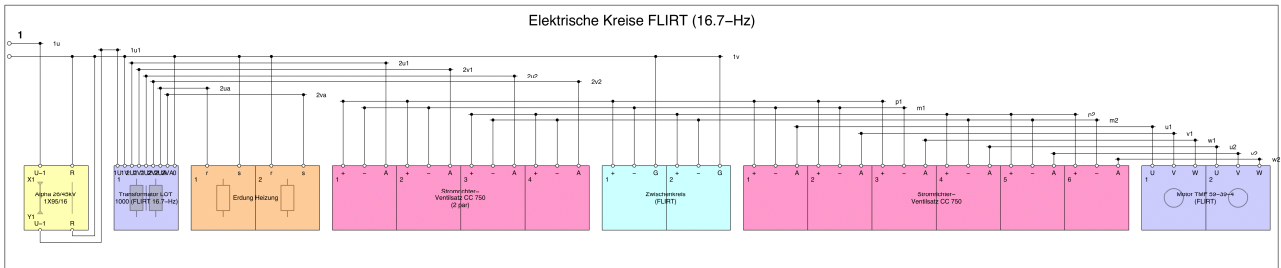
Im dargestellten Beispiel für die Re 460 ist die Beschränkung der Bremskraft auf 150 kN bei Geschwindigkeiten unter 40 km/h deutlich sichtbar (Beschränkung des Pufferdrucks im Hinblick auf das Befahren von engen Weichen).



Zusätzlich ist bei nassem Wetter die beschränkte Reibung zwischen Rad und Schiene zu berücksichtigen. Entsprechende geschwindigkeitsabhängige Koeffizienten (unterschiedlich für Tunnelfahrt und offene Strecke) können bei den Zuglaufrechnungen eingestellt werden.

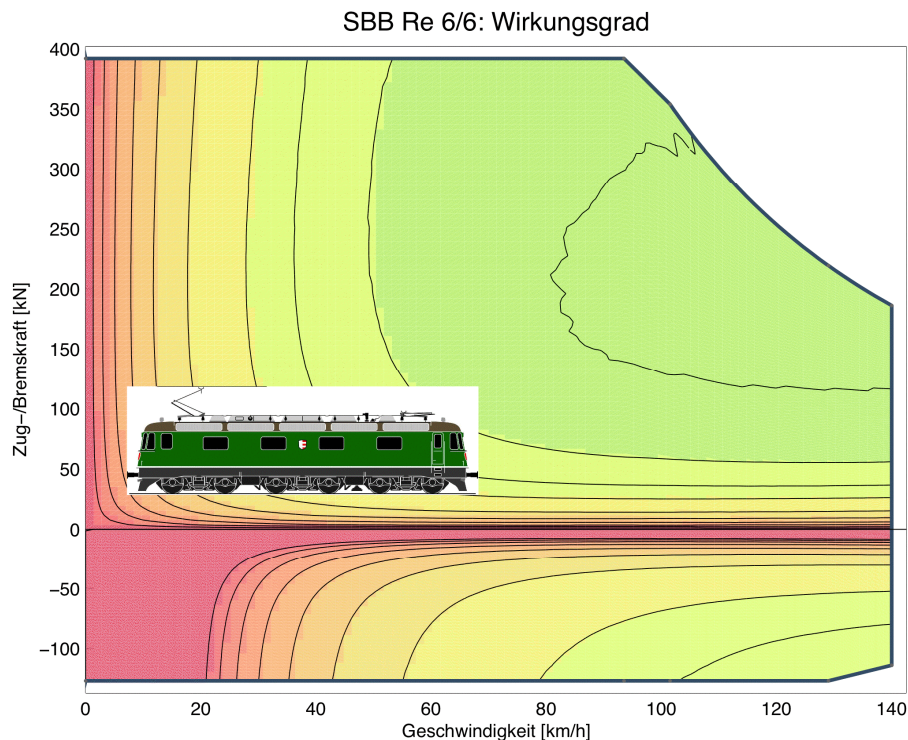
4.3 Elektrische Modelle

Als Beispiel für die elektrischen Kreise eines Triebfahrzeugs sind in der folgenden Figur die Traktionsstromkreise eines Triebkopfes eines FLIRT gezeigt, so wie sie in **emkaTrain** verwendet werden. Auch diese Figur ist automatisch aus den hinterlegten Datensätzen erzeugt.



4.4 Verlustmodelle

Die Schnittstelle zwischen Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm und Energieverbrauch bilden Verlustmodelle für die Triebfahrzeuge. Für jeden Arbeitspunkt Zugkraft / Geschwindigkeit müssen dazu die betreffenden Verluste im Antrieb (elektrisch und mechanisch) sowie die Leistungsaufnahme der Traktions-Hilfsbetriebe bekannt sein. Das Verhältnis aller Verluste zur übertragenen Leistung lässt sich beispielsweise in einem Wirkungsgrad-Diagramm darstellen. Das folgende Beispiel zeigt dasjenige der Re 6/6.



Die verwendeten Verlustmodelle sind auf verschiedene Art entstanden. Dort wo die genauen Daten aller wichtigen Komponenten zur Verfügung stehen (z.B. Widerstände und Induktivitäten von Transformator und Motoren, Stromrichter-Taktfrequenzen und –verlustwerte) können daraus – mit entsprechendem Aufwand – präzise Verlustmodelle gebildet werden. Wo keine solchen Angaben verfügbar sind, müssen Näherungen genügen. Aus Aufwandsgründen kann es auch nötig sein, auf eine sehr genaue Modellierung zu verzichten, selbst wenn die Komponentendaten vorhanden sind (wie beispielsweise beim NPZ). Das erstellte Modell des NPZ ist jedoch in allen Grundzügen korrekt, hat aber einige Vereinfachungen vor allem beim Einfluss der Stromharmonischen auf die Verluste im Transformator und den Motoren (nachgebildet durch Zuschlagsfaktoren). Dagegen sind bei den präzisen Modellen auch solche Einflüsse detailliert nachgebildet.

4.5 Verzeichnis

Von den in den folgenden beiden Tabellen enthaltenen SBB-Triebfahrzeugen wurden während der Studie Simulationsmodelle erstellt.

Die angegebenen zuständigen Stellen beziehen sich darauf, wer heute (nach unserer Einschätzung) de facto die Systemverantwortung für das Fahrzeug trägt, und somit z.B. für Komponentendaten und die Aussagen zur Durchführbarkeit von Änderungen verantwortlich ist.

Lokomotiven

Typ	Hersteller	Heute zuständig	Verlustmodell
Ae 6/6	BBC	SBB IW Bellinzona	Schätzung
Re 4/4 II und III	BBC	SBB IW Bellinzona	Präzises Modell
Re 6/6	BBC	SBB IW Bellinzona	Präzises Modell
Re 450	ABB	SBB IW Yverdon + Bombardier	Gute Näherung ¹⁾
Re 460	ABB / Adtranz	SBB IW Yverdon + Bombardier	Präzises Modell
BR 185 / Re 482	Bombardier	Bombardier	Schätzung ¹⁾
Re 474	Siemens	Siemens	–
Re 484	Bombardier	Bombardier	Schätzung ¹⁾

Triebwagen und Triebzüge

Typ	Hersteller	Heute zuständig	Verlustmodell
RABDe 510 „Mirage“	BBC	SBB IW Zürich	–
RBe 540 „RBe“	BBC	SBB IW Zürich	–
RBDDe 560 „NPZ“	BBC / ABB	SBB IW Yverdon	Gute Näherung
RABe 500 „ICN“	Adtranz / Bombardier	Bombardier	Schätzung
RABe 520 „Seetal-GTW“	Stadler + Bombardier	Stadler + Bombardier	Schätzung ¹⁾
RABe 526 „Thurbo-GTW“	Stadler + ABB	Stadler + ABB	Präzises Modell
RABe 521 und 523 „FLIRT“	Stadler + ABB	Stadler + ABB	Präzises Modell
RABe 524 „Tilo-FLIRT“	Stadler + ABB	Stadler + ABB	Präzises Modell
RABe 514 „DTZ“	Siemens	Siemens	–

¹⁾ Von diesen Triebfahrzeugen existieren zum Zeitpunkt der Berichterstattung die mechanischen Modelle, aber keine Verlustmodelle. Diese können aber mit beschränktem Aufwand später ergänzt werden.

Diesellokomotiven

Von Diesellokomotiven existieren bisher keine Modelle. Die Rechentools erlauben aber – mit entsprechendem Programmieraufwand – eine spätere Ergänzung.

5 Wagen

5.1 Daten

Für die Wagen werden die gleichen mechanischen Daten benötigt wie für Triebfahrzeuge, mit Ausnahme des Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramms. Zusätzlich ist die maximale mechanische Bremskraft (Klotz- oder Scheibenbremsen) von Bedeutung. Diese ist in Realität von vielen Faktoren abhängig und in **emkaTrain** bisher nicht vollständig nachgebildet. Dieser Wert ist für die Resultate jedoch von zweitrangiger Bedeutung, da während der Zuglaufrechnung vereinfachend von einem maximalen Reibungskoeffizienten von etwa 0.15 zwischen Rad und Schiene ausgegangen wird.

5.2 Verfügbare Modelle

Für die Studie wurden sämtliche wichtigen Reisezugwagen der SBB modelliert, sowie einige Güterwagentypen. Daraus lassen sich die genauen Reisezüge zusammenstellen (Anzahl und Art der Wagen). Für die

Güterwagen, deren Daten in Realität ohnehin mit grosser Streuung behaftet sind, ergeben sich typische Fälle. Die Fahrwiderstandswerte für beide Zugarten sind aus älteren Messungen, vorwiegend aus der Zeit der Untersuchungen an der ETH, abgeglichen. Sie stimmen für die Reisezugwagen gut bis sehr gut (Unsicherheit ca. +/- 10...15 %). Für Güterzüge können sie etwas stärker streuen.

6 Zugaufrechnung

6.1 Methode

Bei der Durchführung einer Zugaufrechnung, also der Simulation einer Fahrt eines gegebenen Zuges über eine gegebene Strecke, werden in **emkaTrain** die Bewegungsgleichungen für diskrete Stützstellen entlang des Weges gelöst. Dabei gilt die Annahme, dass der Zug nach Passieren einer Geschwindigkeitseinschränkung sofort wieder beschleunigt, und erst im letzten möglichen Moment vor einer Einschränkung abbremst. Die für jeden Abschnitt zulässige Maximalgeschwindigkeit wird gefahren und gehalten, sofern es die Antriebsleistung und die Reibung zwischen Rad und Schiene erlauben und keine abschnittswisen oder generellen Geschwindigkeitseinschränkungen programmiert sind.

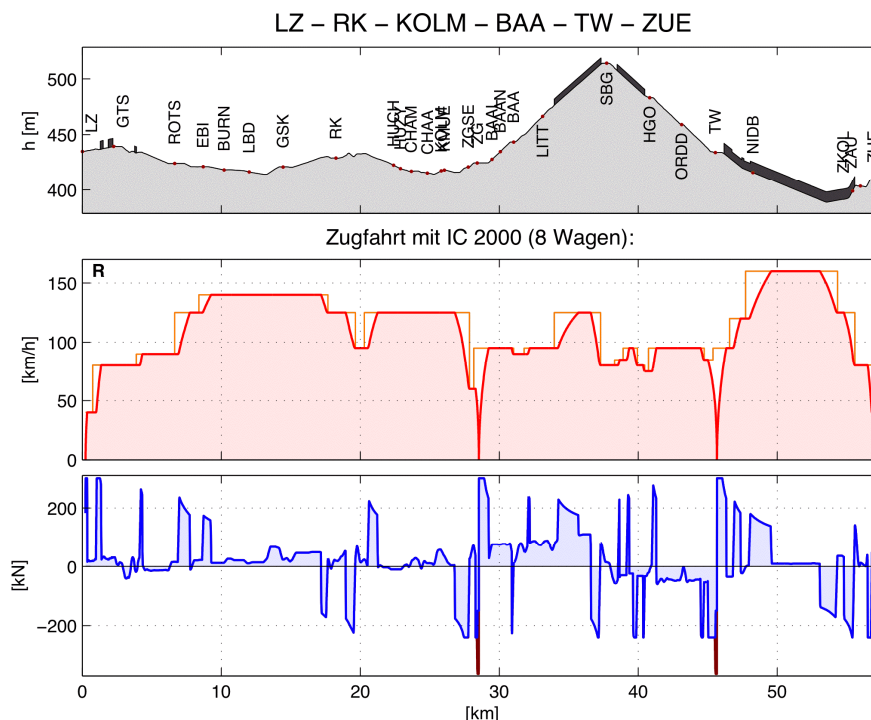
6.2 Randbedingungen

Für die Simulation sind diverse Randbedingungen festzulegen:

- Art der Bedienung der mechanischen Bremsen (maximale Kraft, geschwindigkeits- oder wegabhängig)
- Wetter (trockene Schienen, oder Einschränkung des Reibungswertes zwischen Rad und Schiene)
- Ausrollphasen oder Abschnitte mit reduzierter Beschleunigungsleistung, die dann fahrzeitverlängernd, aber energiesparend wirken.

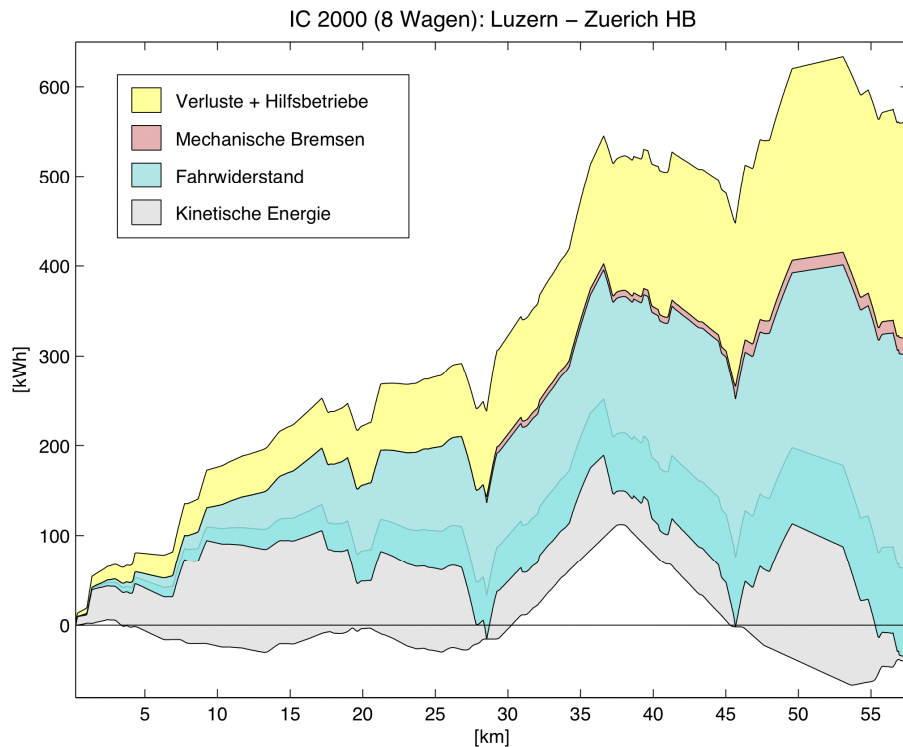
6.3 Beispiel

Gezeigt werden die Ergebnisse einer Zugaufrechnung am Beispiel eines Interregios von Luzern nach Zürich HB. Geführt wird der Zug mit einem IC2000, bestehend aus Re 460 und acht Wagen. Dargestellt ist das Höhenprofil sowie die Geschwindigkeit und Zugkraft gegen den Weg. Blau ist Zugkraft und elektrische Bremse der Lokomotive, dunkelrot die mechanischen Bremsen (Scheibenbremsen) im Zug.



Die zweite Figur zeigt die Energieauswertung dieser Fahrt. Wiederum gegen den Weg dargestellt ist die Energie, die bis zum betreffenden Punkt für verschiedene Anteile aufgewendet wurde. Am Ende der Fahrt entspricht sie der Bilanz. Während die potentielle (unterste Linie) und kinetische Energie (Differenz über der

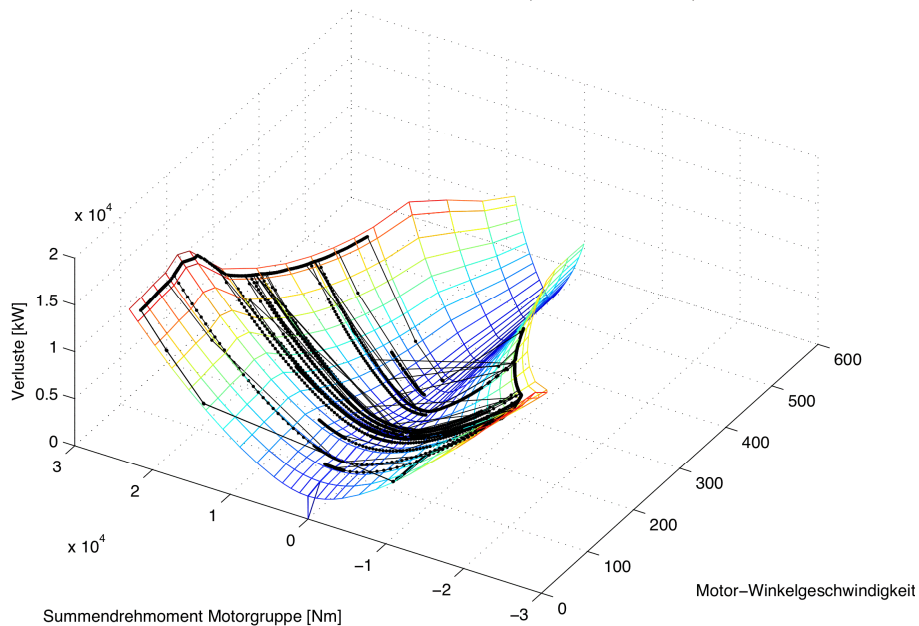
grauen Fläche) in andere Energieformen umgewandelt werden können, nehmen die Verluste (Fahrwiderstand, mechanische Bremsen, Antriebsverluste und Hilfsbetriebe) ständig zu.



6.4 Energierechnung

Zur Ermittlung der in der obenstehenden Figur dargestellten Antriebsverluste gelangt das Verlustmodell des Triebfahrzeugs zur Anwendung. Dabei ist für jede Komponente des Antriebsstrangs und für alle Hilfsbetriebe je ein Kennfeld hinterlegt. Für die Geschwindigkeits- und Zugkraftverläufe der Fahrt kann dann durch zweidimensionale Interpolation der Verlauf der betreffenden Verluste gegen die Zeit ermittelt werden. Dargestellt ist dies am Beispiel der Stromrichter-Leitverluste im Motorstromrichter der Re 460.

Leiterluste Motorstromrichter Re 460 (Strecke LZ – ZUE)



Die so ermittelten Verluste berücksichtigen keine zeitabhängigen Rückkopplungseffekte innerhalb des Antriebs. Sie gelten also beispielsweise nur für eine konstante Temperatur. Sollen auch solche Effekte berücksichtigt werden, ist eine Nachbearbeitung mit Hilfe eines Temperaturmodells notwendig. Für die vorliegende

Studie wurde dies aber nicht durchgeführt, da sich daraus keine anderen und auch keine wesentlich genaueren Aussagen ableiten lassen. Solche zusätzlichen Simulationen sind nur nötig bei der Auslegung eines Fahrzeugs, oder bei präziser Vorherbestimmung seines Energieverbrauchs, beispielsweise im Rahmen eines Angebots für ein Neufahrzeug.

Für die Simulationen im Rahmen der Studie wurden deshalb durchschnittliche Motor- und Transformatortemperaturen berücksichtigt, ausserdem bei frequenzvariablen Hilfsbetrieben (z.B. Motorventilation) eine Drehzahl entsprechend der Stufe 2 von 3 (bzw. 2/3 der Maximaldrehzahl).

7 Literatur

- [1] M. Meyer, S. Menth, M. Lerjen: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB: Schlussbericht zum BFE-Projekt 101826 / 152247 (Projektlaufzeit 1.9.2006 – 30.9.2007).
- [2] M. Meyer, St. Menth: Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB: Arbeitsplan. *emkamatik*-Dokument 06-0140, Version 2 vom 21.8.2006
- [3] M. Meyer, M. Aeberhard: Vom Gratisstrom zur Energiesparlokomotive – Energieverbrauch bei elektrischen Bahnen. Schweizer Eisenbahn-Revue und Eisenbahn-Revue International 1-2/1997, Seiten 28 – 39

Versionsinformation

--	24.9.2007	MM	---
1	13.12.2007	MM	Referenz [1] bezieht sich auf BFE-Schlussbericht statt Dokument 07-0203

© 2007 *emkamatik* GmbH, Wettingen. Dieses Dokument oder Informationen daraus dürfen ohne unsere ausdrückliche Erlaubnis nicht an Dritte weitergegeben werden.