



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

Machbarkeitsstudie Energieeffizienz FLIRT.

Étude de faisabilité sur l'efficacité énergétique des véhicules FLIRT.

Schlussbericht

Rapport final

Johannes Dréwniok / Ueli Kramer / Matthias Tuchschrnid, Schweizerische Bundesbahnen SBB
Personenverkehr, Wylerstrasse 123/125, 3000 Bern 65, johannes.drewniok@sbb.ch / www.sbb.ch

Markus Meyer / Markus Lerjen, emkamatik GmbH
Rebbergstrasse 20a, CH-5430 Wettingen

Begleitgruppe

BAV: Walter Josi, Stefan Schnell, Tristan Chevroulet, Daniel Schaller (PO).

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)
CH-3003 Bern

Programmleiter

Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 059 (der ESöV 2050-Programms)

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 12.10.2017

Inhaltsverzeichnis

1.	Executive Summaries	5
1.1.	Machbarkeitsstudie Energieeffizienz FLIRT	5
1.2.	Résumé de l'étude de faisabilité	6
1.3.	Executive Summary of feasibility study.....	7
2.	Machbarkeitsstudie Energieeffizienz FLIRT.....	8
2.1.	Übersicht der Fahrzeuge.....	8
2.2.	Ausgangslage und Projektübersicht	8
2.3.	Untersuchte Massnahmen.....	8
2.3.1.	Antriebssteuerung	8
2.3.2.	Anpassung der Fahr- / Bremskennlinien des Fahrschalters.....	9
2.3.3.	Schnellere Aktivierung des Schlummerbetrieb	9
2.3.4.	Abschaltung von Hilfsbetriebe und Batterienetzverbrauchern.....	9
2.3.5.	Anpassungen an der HLK-Steuerung	10
2.3.6.	Summe der Energieeinsparungen und Wirtschaftlichkeit.....	10
2.4.	Weitere untersuchte Energiesparmassnahmen.....	11
2.4.1.	Trockentransformator	11
2.4.2.	Aerodynamische Optimierung der Dachblenden	11
2.5.	Branchenaustausch und nächste Schritte	11
3.	Résumé de l'étude de faisabilité sur l'efficacité énergétique des véhicules FLIRT.....	12
3.1.	Vue d'ensemble des véhicules	12
3.2.	Situation initiale et vue d'ensemble du projet.....	12
3.3.	Mesures envisagées	12
3.3.1.	Commande de la traction	12
3.3.2.	Adaptation des courbes caractéristiques de traction et de freinage du manipulateur de traction/freinage	13
3.3.3.	Activation plus rapide du mode veille	13
3.3.4.	Déclenchement de services auxiliaires et de consommateurs du circuit des batteries.....	13
3.3.5.	Adaptation de la commande CVC	14
3.3.6.	Ensemble des économies d'énergie et rentabilité.....	14
3.4.	Autres mesures d'économie d'énergie envisagées.....	14
3.4.1.	Transformateur sec	14
3.4.2.	Optimisation des caractéristiques aérodynamiques des panneaux de toit.....	15

Zugeordnete Dokumente

Nr.	Titel	Dokumentenstatus	Autor	Datum
[1]	Energiesparpaket SBB-FLIRT - Schlussbericht	Internes Dokument	emkamatik	1.2.2016
[2]	Massnahmen und Einsparungen Schlummerbetrieb	Internes Dokument	emkamatik	1.2.2016
[3]	Massnahmen und Einsparungen Traktion	Internes Dokument	emkamatik	1.2.2016
[4]	Zusammenstellung der mittleren jährlichen Fahrleistungen und der mittleren Betriebsstunden pro Teilflotte	Internes Dokument	SBB	1.12.2015
[5]	Protokolle der Besprechungen vom 15. März 2015, 5. Juni 2015, 16. September 2015, 26. Oktober 2015 und 26. Januar 2016	Internes Dokument	SBB	-



Quelle: „SBB RABe 523 FLIRT der Zuger S-Bahn“ von Kabelleger / David Gubler (<http://www.bahnbilder.ch>) - <http://www.bahnbilder.ch/picture/349>. Lizenziert unter GFDL über Wikimedia Commons.

1. Executive Summaries

1.1. Machbarkeitsstudie Energieeffizienz FLIRT

In der Energiestrategie der SBB kommt der Steigerung der Energieeffizienz und somit dem Energiesparen eine Schlüsselrolle zu. Bis zum Jahr 2025 will die SBB nur noch mit Strom aus erneuerbaren Energien fahren. Dafür will sie rund 20 Prozent ihres prognostizierten Jahresenergieverbrauchs, also 600 Gigawattstunden, einsparen.

Auch bei relativ modernen Triebfahrzeugen wie dem FLIRT, lässt sich die Energieeffizienz noch weiter steigern. Insgesamt wurden in einer Machbarkeitsstudie Massnahmen aus den Bereichen

- Antriebsoptimierung (Zwischenkreisspannung, Fahrmotorfluss, Teillastbetrieb, Taktsperre bei Stillstand, Trockentransformator),
- Fahrzeugbedienung (Fahrschalter-Kennlinie, Bereitstellzeit),
- Abstellung (Schlummerbetrieb, Überfuhrbetrieb, Druckluftsystem, Hilfsbetriebe und Verbraucher, Kühlung von Komponenten) und
- Aerodynamik

untersucht und bewertet. Für die Abschätzungen wurden die nötigen Grundlagen erarbeitet und der Ist-Zustand auf den Fahrzeugen evaluiert.

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die gesamten durch Softwareanpassungen im Fahrzeugleitgerät und im Stromrichter zusammen erreichbaren Einsparungen knapp 85 MWh pro Jahr je Fahrzeug betragen. Dies entspricht 13.5 GWh/Jahr für der Umrüstung aller Fahrzeuge der Flotte, sofern sich mit Rücksicht auf die Kosten der Softwarezulassung alle realisieren lassen. Weitere Energieeinsparungen lassen sich durch den Einsatz von Trockentransformatoren als Traktionstransformatoren oder aerodynamische Optimierungen im Dachbereich realisieren.

Durch die Fahrzeuglieferantin sind die Kosten einzelner Massnahmen aufgezeigt. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Massnahmen erfolgt durch die SBB und zeigt aufgrund unterschiedlicher Teilflottengrößen und betroffener Zulassungen im In- und Ausland grosse Unterschiede. Je nach Massnahme liegt der statische Payback zwischen wenigen Jahren und mehreren Jahrzehnten. In der folgenden Realisierung sollen wirtschaftliche Massnahmen umgesetzt werden mit statischem Payback zwischen 2 und 11 Jahren.

Diese Machbarkeitsstudie wurde im Rahmen der Energiestrategie 2050 des öffentlichen Verkehrs vom Bundesamt für Verkehr mit 68'860 CHF unterstützt, die Projektnummer lautet 059 Studie Energiesparpaket FLIRT. Der Bearbeitungszeitraum ist vom 17. Februar 2015 bis zum 15. Februar 2016.

1.2. Résumé de l'étude de faisabilité

L'accroissement de l'efficacité énergétique et donc des économies d'énergie joue un rôle prépondérant dans la stratégie énergétique des CFF. D'ici à 2025, les CFF se sont engagés à ne plus utiliser que du courant issu d'énergies renouvelables. Pour y parvenir, ils entendent réduire leur consommation d'énergie annuelle de 20%, ce qui représente 600 GWh.

Même dans le cas de véhicules moteurs aussi modernes que les véhicules FLIRT, l'efficacité énergétique peut encore être renforcée. Une étude de faisabilité a donc été réalisée dans le but d'envisager et d'évaluer diverses mesures portant sur les aspects suivants:

- optimisation de la traction des véhicules (tension du circuit intermédiaire, flux des moteurs de traction, mode de charge partielle, blocage des impulsions à l'arrêt, transformateur sec);
- maîtrise des véhicules (courbe caractéristique du manipulateur de traction/freinage, temps de préchauffage);
- garage des véhicules (mode veille, mode d'acheminement, système d'air comprimé, services auxiliaires et consommateurs, refroidissement de composants);
- aérodynamisme.

Des documents de référence ont été élaborés et l'état réel des véhicules a été évalué pour faciliter l'appréciation des mesures envisagées.

L'étude a permis de démontrer qu'il serait possible d'économiser pas moins de 85 MWh par an et par véhicule en adaptant les logiciels de la logique de commande et du convertisseur des véhicules en question. Cela représente au total 13,5 GWh/an pour l'ensemble des véhicules de la flotte, à condition toutefois que le coût d'homologation des logiciels ainsi modifiés ne soit pas jugé excessif. Par ailleurs, l'utilisation de transformateurs secs en guise de transformateurs de traction ou une optimisation des caractéristiques aérodynamiques des toits des véhicules pourrait permettre de réduire davantage les coûts.

Le fabricant des véhicules a fourni des informations sur les coûts induits par les diverses mesures. Les CFF se sont chargés d'évaluer leur rentabilité respective. De grandes divergences ont ainsi pu être constatées compte tenu des différences de taille entre les flottes partielles et des particularités concernant l'homologation des véhicules en Suisse ou à l'étranger. Ainsi, si certaines mesures peuvent être rentabilisées en quelques années seulement (payback statique), d'autres ne peuvent l'être qu'au terme de plusieurs décennies. Les mesures économiques envisagées dans la suite du document ont un seuil de rentabilité compris entre 2 et 11 ans.

La présente étude de faisabilité a été cofinancée par l'OFT à hauteur de CHF 68 860 dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050. Le projet, intitulé «Studie Energiesparpaket FLIRT (Étude relative au programme d'économie d'énergie FLIRT)», porte le numéro 059. L'étude a été réalisée entre le 17 février 2015 et le 15 février 2016.

1.3. Executive Summary of feasibility study

In the SBB's energy strategy increasing energy efficiency and thus energy saving plays a key role. By the year 2025 the SBB wants to drive only with electricity from renewable energies. For this, the SBB wants to save about 20 percent of its projected annual energy consumption, that is 600 gigawatt hours.

Even with relatively modern vehicles such as the FLIRT, energy efficiency can be further increased. In a feasibility study measures from the fields of

- Drive optimization (DC link voltage, magnetic flux, partial load operation, clock inhibit at standstill, dry transformer),
- Vehicle operation (traction/break switch characteristics, scheduling time),
- Parked vehicle (sleep mode, transfer services, compressed air system, auxiliary power supply and consumer, cooling of components) and
- Aerodynamics

examined and assessed. The necessary basics for the assessments were worked out and the current state on the vehicles was evaluated.

The study concludes that the total savings achieved through software adaptations in the vehicle control system and in the traction converter are just under 85 MWh per year per vehicle. This corresponds to 13.5 GWh / year for the conversion of all vehicles of the fleet, provided that all costs can be realized with regard to the costs of the software licensing. Further energy savings can be achieved by the use of dry transformers as traction transformers or aero-dynamic optimization in the roof area.

The costs of individual measures are indicated by the vehicle supplier. The assessment of the economic efficiency of the individual measures is carried out by SBB and shows great differences due to different partial fleet sizes and the relevant approvals in Switzerland and abroad. Depending on the measure, the static payback is between a few years and several decades. In the following implementation, economic measures are to be implemented with a static payback between 2 and 11 years.

This feasibility study was supported by the Federal Transport Office (Bundesamt für Verkehr) in the framework of the energy strategy 2050 of public transport with 68'860 CHF, the project number is 059 Studie Energiesparpaket FLIRT. The processing period is from February 17th 2015 to February 15th 2016.

2. Machbarkeitsstudie Energieeffizienz FLIRT

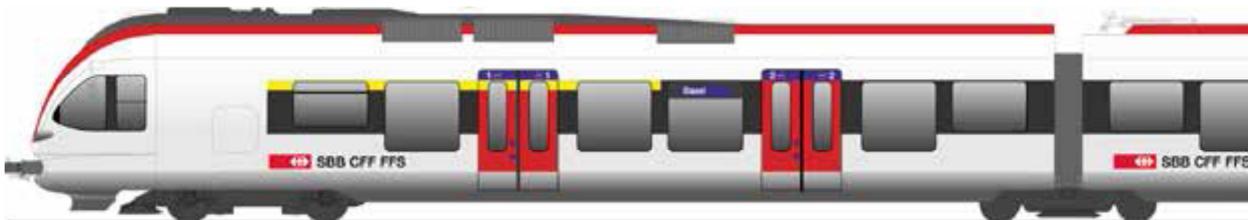
Innerhalb der Machbarkeitsstudie wurden verschiedene Dokumente erarbeitet, welche für diesen Schlussbericht zusammengefasst werden. Der vorliegende Bericht orientiert sich am zusammenfassenden Schlussbericht von emkamatik [1].

2.1. Übersicht der Fahrzeuge

In der Energiestrategie der SBB kommt der Steigerung der Energieeffizienz und somit dem Energiesparen eine Schlüsselrolle zu. Bis zum Jahr 2025 will die SBB nur noch mit Strom aus erneuerbaren Energien fahren. Dafür will sie rund 20 Prozent des prognostizierten Jahresenergieverbrauchs, also 600 Gigawattstunden, einsparen.

Heute besitzt die SBB 159 Fahrzeuge des Typs FLIRT und hat Stadler AG mit dem Bau von weiteren Fahrzeugen beauftragt. Diese Fahrzeuge sind zwar alle sehr ähnlich aufgebaut, es bestehen aber einige technische Unterschiede zwischen den insgesamt 11 verschiedenen technischen Varianten. Diese betreffen v.a. die Auslandsfähigkeit der Fahrzeuge bezüglich Antriebstechnik (und der entsprechenden Zulassung im Ausland), unterschiedlichen Klimageräten, der Ausrüstung mit ETCS und der eingesetzten Kundeninformationssysteme. Um die Fahrzeuge untereinander koppelbar zu machen, wurde auch auf neueren Fahrzeugen ein älterer Stand der Leittechniksoftware eingesetzt. Neben der SBB besitzen noch weitere Bahnbetreiber FLIRT-Fahrzeuge: Die SOB (Südostbahn) ist im Besitz von insgesamt 23 Fahrzeugen, die TPF (Transports publics fribourgeois) hat 8 FLIRT, transN besitzen 7 FLIRT.

Abbildung 1: Skizze des FLIRT-Fahrzeuges der SBB.



2.2. Ausgangslage und Projektübersicht

Wie bereits aus einer früheren Potentialanalyse von emkamatik¹ hervorgeht, wäre bereits durch eine Aktualisierung der Stromrichter-Software ein gewisses Energieeinsparpotential möglich. Die Firma Stadler hat zudem seit der Inbetriebsetzung des ersten FLIRT einige Erfahrungen bezüglich der energetischen Verbesserung ihrer Fahrzeuge gemacht, zu nennen sind vor allem die Projekte in Finnland (FLIRT Helsinki), Norwegen (FLIRT NSB), Weissrussland (FLIRT Belarus) und der Regio-Dosto (KISS).

Vor diesem Hintergrund erhielt Stadler Bussnang AG einen Studienauftrag von den SBB, in dessen Rahmen die Sparpotentiale für alle Teilstrecken genau zu ermitteln waren. Die Arbeiten dazu wurden durch Stadler und emkamatik durchgeführt. Zudem wurde abgeklärt, auch zusammen mit ABB als Lieferantin des Stromrichters, welchen Aufwand die Anpassungen bedeuten.

Als Ergebnis des Projekts erstellte Stadler zuhanden der SBB Richtofferten für die Änderungen. Das Energiesparpotential, aufgeschlüsselt nach den einzelnen Teilstrecken, wurde durch emkamatik dokumentiert.

2.3. Untersuchte Massnahmen

In der Studie wurden systematisch alle möglichen Ansätze zur Optimierung der Energieeffizienz untersucht, weitere Details finden sich in den Gesprächsprotokollen [5]. Im Folgenden werden diejenigen Ansätze etwas detaillierter beschrieben, welche von emkamatik und Stadler zur Umsetzung empfohlen wurden. Dabei orientiert sich die Darstellung am Schlussbericht von emkamatik [1].

2.3.1. Antriebssteuerung

Die Optimierung des Antriebs umfasst in der Steuerung des Stromrichters (Power Electronic Controller, PEC)

¹ „Verlustoptimierung für den FLIRT“, erstellt am 21.8.2009 von Markus Meyer, emkamatik. Die Potentialanalyse wurde als Studie im Auftrag der Stadler Rail erstellt, die SBB darf Einblick nehmen und sich in Arbeiten darauf beziehen.

- Optimierung der Zwischenkreisspannung.
- Detailoptimierung des Fahrmotorflusses:
 - Umstellung der Pulsmuster im Motorstromrichter auf "Flattop" bei hoher Aussteuerung,
 - Erhöhung der Fahrmotorspannung bei hoher Leistung.

Zusätzlich gehören folgende Änderungen im Fahrzeug-Leitgerät (FLG) zur Optimierung des Antriebes:

- Taksperre an einzelnen Motorstromrichtern bei Teillast
- Taksperre an allen Netzstromrichtern im Stillstand

Die Einführung von synchronen Pulsmuster und einer weiteren Erhöhung der Fahrmotorspannung wird nicht empfohlen. Die mögliche zusätzliche Energieeinsparung (ca. 0.4 %) steht in keinem Verhältnis zum Aufwand (notwendig wäre dazu der Ersatz der Stromrichter-Leittechnik (PEC) durch eine neue Generation sowie ein teilweiser Ersatz der Fahrmotorregelung, inkl. Neuzulassung der entsprechenden Software).

Insgesamt führt die Optimierung des Antriebes auf den Fahrzeugen zu einer Einsparung von rund 3.3%. Bei der Fahrleistung gemäss [4] ergeben sich damit Einsparungen zwischen 15 MWh/a*Fzg. - 30 MWh/a*Fzg.

2.3.2. Anpassung der Fahr- / Bremskennlinien des Fahrschalters

Die Fahrschalter der FLIRT sind heute aus Energieverbrauchssicht ungünstig programmiert. Sowohl beim Fahren als auch beim Bremsen ist die Auslenkung proportional zur Zug- bzw. Bremskraft. Dadurch lässt sich – bei kurzen Fahrzeiten – der Verzicht auf die pneumatische Bremse durch den Lokführer nur schlecht steuern. Zudem entstehen bei der Beschleunigung auch bei reduzierter Zugkraftanforderung bei höheren Geschwindigkeiten unnötig hohe Antriebsverluste.

Die dem Fahrschalter hinterlegten Kennlinien lassen sich geschwindigkeitsabhängig so anpassen, dass diese bei den Nachteile behoben sind. Die Bedienung der FLIRT wird dann analog zu den Regio-Dosto, wo sich dieses Konzept sehr gut bewährt hat.

Die Abschätzung der Änderung auf den Energieverbrauch beruht auf Simulationen und Annahmen für die Bedienung der Züge, nämlich derjenigen, dass die Lokführer bereits heute etwa die Hälfte der theoretisch möglichen Einsparungen durch eine geeignete Bedienung selbst umsetzen.

Die Modifikation der Fahr- und Bremskennlinien des Fahrschalters führt zu einer Erhöhung der Energieeffizienz um rund 5%. Bei einer Fahrleistung gemäss [4] und einem Einsatz der Fahrzeuge gemäss heutigem Einsatz ergeben sich damit Einsparungen von 22 MWh/Fzg.*a bis 44 MWh/Fzg.*a.

2.3.3. Schnellere Aktivierung des Schlummerbetrieb

Die Aktivierung des Schlummerbetriebs erfolgt heute mit einer Zeitverzögerung von 30 Minuten. Eine wesentliche Einsparung ergibt sich, wenn der Schlummerbetrieb nach dem Abrüsten des Zuges (Führerstand nicht besetzt, Türen geschlossen, Licht im Fahrgastraum aus) sofort eingeleitet wird. Für die Hochrechnung wurde (basierend auf einer stichprobenartigen Auszählung von CERES-Einsatzplänen) angenommen, dass pro Jahr 550 Mal der Schlummerbetrieb je Zug aktiviert wird (entspricht 1.5 Mal pro Tag).

Bei der Deaktivierung des Schlummerbetriebs besteht kein Energiesparpotential mehr, da sie heute erst bei der Besetzung des Führerstands, also im letztmöglichen Zeitpunkt, erfolgt.

Durch die Optimierung der Aktivierungskriterien des Schlummerbetriebes ergibt sich pro Mal eine Einsparung von 14 kWh. Bei 550 Schlummerbetriebseinsätzen pro Jahr (1.5 pro Tag) ergibt sich eine jährliche Einsparung von 7.7 MWh/Fzg.*a. Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf entspricht dies rund 1%.

2.3.4. Abschaltung von Hilfsbetrieben und Batterienetzverbrauchern

Bei den Hilfsbetrieben bestehen verschiedene Potentiale:

- Elimination von Umrichterverlusten durch Abstellen von Hilfsbetriebsumrichtern oder durch Abrüsten eines ganzen Halbzuges sowie durch Abschalten der Kühlwasserpumpen.
- Reduktion von Umrichterverlusten im Netzstromrichter durch Reduktion der Wiederantaktschwelle bei tiefer Netzspannung.
- Reduktion der Kompressorlaufzeit durch Anpassen der Ein- und Ausschaltschwellen und durch eine Reduktion des Luftverbrauchs des Bioreaktors.
- Reduktion der Ventilationslaufzeiten durch eine angepasste Kennlinie, die eine im Mittel höhere Kühlwassertemperatur zulässt.

Die Änderung der Kennlinien und Umschaltschwellen für Kompressor und Ventilation in der Fahrzeugsoftware wird empfohlen, ebenso die Anpassung der Wiederantaktschwelle des Netzstromrichters. Die Abschaltung eines Halbzuges wird empfohlen, bedarf aber detaillierter Abklärungen. Die Abschaltung eines einzelnen HBU wird hingegen nicht empfohlen.

Bei den Batterienetzverbrauchern werden die meisten Verbraucher bereits heute abgeschaltet, oder sie werden auch im Schlummerbetrieb benötigt. Potential besteht theoretisch noch bei den Geräten für Zugsicherung, Funk und Geschwindigkeitsmessung. Die Umsetzung erfordert aber den Einbau von Schaltelementen (Relais/Schütze) auf allen Zügen, weshalb die Umsetzung nicht empfohlen wird.

Insgesamt führen die Abschaltungen von Hilfsbetrieben zu einer Reduktion im Energiebezug von 24 MWh/Fzg.*a bis 28 MWh/Fzg.*a, resp. 3-4 % pro Jahr.

2.3.5. Anpassungen an der HLK-Steuerung

Die heutige Steuerung der HLK-Anlagen (Heizung, Lüftung, Klimaanlage) im Schlummerbetrieb ist bereits weitgehend optimal. Das einzige Potential konnte in der Kennlinie für den Überhitzungsschutz geortet werden, die neu von der Außentemperatur abhängig gemacht werden könnte.

Zusätzlich ergibt sich ein Einsparpotential im sogenannten Überfuhrbetrieb: Bei der Überfuhr von Zügen ohne Passagiere werden die Fahrgasträume heute gleich wie im Fahrgastbetrieb voll klimatisiert. Vorgeschlagen wird deshalb, dass bei Wahl des bereits vorhandenen Überfuhrbetriebes die HLK-Anlagen der Fahrgasträume nach den gleichen Vorgaben wie im Schlummerbetrieb betrieben werden (also lediglich Frostschutz resp. Überhitzungsschutz), obwohl der Führerstand besetzt und der Zug in Betrieb ist.

Eine Quantifizierung dieser Energieeinsparung konnte mangels Daten nicht vorgenommen werden.

2.3.6. Summe der Energieeinsparungen und Wirtschaftlichkeit

Für die Hochrechnung der Einsparung aller vorangehenden empfohlenen Massnahmen wurden die von den SBB zusammengestellten Laufleistungen der einzelnen Teilflotten und Betriebsstunden gemäss [4] übernommen und gerundet. Bei den Fahrzeugen mit Einsatz in verschiedenen Ländern wurden die Betriebszeiten proportional zu den Kilometerleistungen auf die beiden Länder aufgeteilt. Die Zeiten für „Fahrt“ umfassen dabei die reinen Fahrzeiten ($v > 0$) des kommerziellen Betriebs, sowie die Zeiten für Dienstfahrten und Rangieren. Die Haltezeiten im kommerziellen Betrieb sind den Stillstandszeiten zugerechnet.

Die gesamten, durch Softwareanpassungen im FLG und im Stromrichter zusammen erreichbaren Einsparungen betragen je nach Einsatz und Fahrleistung ca. 75 bis 95 MWh pro Jahr und Fahrzeug.

Die gesamten, durch Software im FLG und im Stromrichter zusammen erreichbaren Einsparungen betragen somit knapp 13.5 GWh/Jahr, sofern sich mit Rücksicht auf die Kosten der Softwarezulassung alle realisieren lassen.

Durch die Fahrzeuglieferantin sind die Kosten einzelner Massnahmen aufgezeigt. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Massnahmen erfolgt durch die SBB und zeigt aufgrund unterschiedlicher Teilflottengrössen und betroffener Zulassungen im In- und Ausland grosse Unterschiede. Je nach Massnahme liegt der statische Payback zwischen wenigen Jahren und mehreren Jahrzehnten. In der folgenden Realisierung sollen wirtschaftliche Massnahmen umgesetzt werden mit statischem Payback zwischen 2 und 11 Jahren.

Zusammenfassung des mittleres Energiesparpotenzials		
Antriebsoptimierung	25	MWh/a pro Fahrzeug
Optimierte Fahrzeugbedienung	32	MWh/a pro Fahrzeug
Optimierte Abstellung	28	MWh/a pro Fahrzeug
Summe des mittleren Einsparpotenzials	85	MWh/a pro Fahrzeug
Energiesparpotenzial der 159 SBB FLIRT Fahrzeuge	13.5	GWh/a der Flotte

Tabelle 2: Zusammenfassung des mittleres Energiesparpotenzials nach Massnahmengruppe. Die effektiven Energiesparpotenziale sind abhängig vom Einsatzprofil und der Ausführung der Fahrzeuge.

2.4. Weitere untersuchte Energiesparmassnahmen

Im Rahmen der Studie zur Energieeffizienz auf dem FLIRT wurden zudem die mögliche Einsparung durch einen Trockentransformator und die aerodynamische Optimierung der Dachblenden untersucht.

2.4.1. Trockentransformator

Die Installation eines Trockentransformators ist nur möglich auf den Einsystem- Fahrzeugfamilien FLIRT RegiOlten II der Reihe RABe 523. Die Transformatoren der FLIRT - TILO - Teilstoffen (RABe 524) können nach heutigem Stand nicht als Trockentransformatoren gebaut werden, ebenso nicht diejenigen der Zweifrequenzfahrzeugfamilie FLIRT France (RABe 522). Die Simulationen (Modelle, Lastspiele) sind konsistent mit denjenigen für die Antriebssoftware und erlauben einen direkten Vergleich. In der Simulation wird angenommen, dass Fahrzeuge mit Trockentransformatoren immer über die optimierte Antriebssoftware verfügen.

Unter der Annahme eines durchschnittlichen Betriebsprofils ergeben sich die Einsparungen für einen RABe 523 von 93 MWh pro Jahr bei einer Laufleistung von 180'000 km pro Jahr.

2.4.2. Aerodynamische Optimierung der Dachblenden

Es ist denkbar, auf den FLIRT-Zügen entweder die seitlichen Dachblenden zu entfernen (analog zu den Zügen vom Typ FLIRT 3), oder das Dach mit allen seinen Apparaten vollständig zu verkleiden. Für beide Varianten hat emkamatik Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse geben aber nur die mögliche Größenordnung an und beruhen auf Näherungen für die Abhängigkeit des Luftwiderstands von quer- und längsstehenden Flächen (und nicht auf detaillierten aerodynamischen Simulationsprogrammen). Angesichts der Komplexität der Dachaufbauten könnten nur Messungen genauere Angaben liefern. Gemäss Simulation führt die aerodynamische Optimierung zu einer Einsparung von 21 MWh/a*Fzg in der Variante ohne Dachblenden, resp. 12 MWh/a*Fzg für die Vollverkleidung.

An der Besprechung vom 26. Januar 2016 wurden teils widersprüchliche Erfahrungen bezüglich Wegnahme von Dachblenden diskutiert (teils wurde in Messungen auch ein Mehrbedarf ermittelt). Stadler empfiehlt deshalb der SBB, eigenständig Messfahrten mit und ohne Dachblenden durchzuführen, um das Einsparpotential zu ermitteln.

Zusammenfassung des weiteren Energiesparpotenzials

Optimierung Aerodynamik	12 MWh/a pro Fahrzeug
Trockentransformator	93 MWh/a pro Fahrzeug

Tabelle 3: Zusammenfassung des weiteren Energiesparpotenzials. Die effektiven Energiesparpotenziale sind abhängig vom Einsatzprofil und der Ausführung der Fahrzeuge.

2.5. Branchenaustausch und nächste Schritte

Im Rahmen der Studie wurde der Austausch mit weiteren Eisenbahnverkehrsunternehmen gesucht, die ebenfalls Fahrzeuge der Lieferantin Stadler betreiben. Es zeigte sich jedoch schnell, dass Synergien einer möglichen Umsetzung nur innerhalb einer Fahrzeugfamilie zu erwarten sind und auch dann eine Umsetzung immer fahrzeugspezifisch angeschaut werden muss.

Jedoch ist das Interesse der Unternehmen SOB, tpf und transN gross, sich an einem Folgeprojekt der SBB zur Umsetzung der wirtschaftlichen Energiesparmassnahmen auf FLIRT Fahrzeugen zu beteiligen. Hierzu wurde durch die SBB ein neues Projekt gestartet, welches vom Bundesamt für Verkehr im Rahmen der Energiestrategie 2050 des öffentlichen Verkehrs unter der Projektnummer 79 gefördert wird.

	SBB	SOB	tpf	transN
Anzahl FLIRT Fahrzeuge je Eisenbahnverkehrsunternehmen	159	23	8	7

3. Résumé de l'étude de faisabilité sur l'efficacité énergétique des véhicules FLIRT

Les documents établis dans le cadre de l'étude sont brièvement présentés dans ce chapitre. Le présent rapport s'appuie sur le rapport final succinct de la société emkamatik [1].

3.1. Vue d'ensemble des véhicules

L'accroissement de l'efficacité énergétique et donc des économies d'énergie joue un rôle prépondérant dans la stratégie énergétique des CFF. D'ici à 2025, les CFF se sont engagés à ne plus utiliser que du courant issu d'énergies renouvelables. Pour y parvenir, ils entendent réduire leur consommation d'énergie annuelle de 20%, ce qui représente 600 GWh.

Les CFF comptent actuellement 159 véhicules FLIRT et ont chargé la société Stadler d'en fabriquer d'autres. Bien que de construction relativement identique, ces véhicules présentent des divergences techniques puisqu'il en existe pas moins de 11 variantes. Cela s'explique notamment par les exigences spécifiques auxquelles les véhicules circulant à l'étranger doivent répondre (traction et homologation y afférente, climatisation, équipement ETCS et système d'information client). Pour assurer la compatibilité des véhicules, les nouveaux modèles ont été équipés des mêmes logiciels de logique de commande que ceux des véhicules plus anciens. Les CFF ne sont pas la seule entreprise de chemin de fer à posséder des véhicules FLIRT. En effet, on en compte 23 au Schweizerische Südostbahn (SOB), 8 aux Transports publics fribourgeois (TPF) et 7 aux Transports Publics Neuchâtelois (transN).

3.2. Situation initiale et vue d'ensemble du projet

Une analyse des potentiels menée il y a quelques années par la société emkamatik² a révélé qu'une mise à jour du logiciel du convertisseur permettrait déjà de faire des économies d'énergie. En outre, depuis la mise en service des premiers véhicules FLIRT, la société Stadler a procédé à des optimisations énergétiques ciblées. Des projets de ce type ont notamment été menés en Finlande (FLIRT Helsinki), en Norvège (FLIRT NSB), en Biélorussie (FLIRT Belarus) et dans le cas du train duplex Regio (KISS).

Les CFF ont donc confié un mandat d'étude à la société Stadler Bussnang AG pour déterminer avec précision les potentiels d'économie des différentes flottes partielles. Les travaux y afférents ont été réalisés par les sociétés Stadler et emkamatik. La charge de travail qui serait induite par les adaptations envisagées a également été analysée conjointement avec le fabricant du convertisseur, la société ABB.

Au terme du projet, la société Stadler a remis aux CFF des offres indicatives portant sur les modifications en question. La documentation du potentiel d'économie d'énergie des différentes flottes partielles a été assurée par la société emkamatik.

3.3. Mesures envisagées

L'étude a été menée en veillant à analyser systématiquement toutes les possibilités d'optimisation de l'efficacité énergétique; pour obtenir des détails complémentaires à ce sujet, se référer aux comptes rendus des entretiens [5]. Les mesures recommandées par les sociétés emkamatik et Stadler sont explicitées en détail dans la suite du document. La présentation des données s'inspire du rapport final de la société emkamatik [1].

3.3.1. Commande de la traction

Au niveau de la commande du convertisseur (Power Electronic Controller [PEC]), l'optimisation de la traction comprend les éléments suivants:

- l'optimisation de la tension du circuit intermédiaire;
- l'optimisation ciblée du flux des moteurs de traction;
 - l'adaptation du modèle d'impulsions dans le convertisseur de courant de traction (sur «flat top») en cas de forte déviation;
 - l'augmentation de la tension d'alimentation des moteurs de traction en cas de forte puissance.

Les modifications suivantes de la logique de commande du véhicule (FLG) permettraient d'optimiser la traction:

- le blocage des impulsions dans certains convertisseurs de courant de traction en cas de charge partielle;
- le blocage des impulsions au niveau de tous les convertisseurs statiques lorsque le véhicule est à l'arrêt.

² Analyse «Verlustoptimierung für den FLIRT (Enraiemment des pertes liées aux véhicules FLIRT)», réalisée le 21 août 2009 par Markus Meyer, de la société emkamatik. L'analyse des potentiels a été effectuée sous la forme d'une étude pour le compte de Stadler Rail; les CFF ont le droit de la consulter et de s'y référer dans le cadre de travaux.

Il n'est pas recommandé d'introduire des modèles d'impulsions synchrones ni d'augmenter la tension d'alimentation des moteurs de traction. Le potentiel d'économies d'énergie supplémentaires (env. 0,4%) est relativement faible par rapport aux charges induites. (Cela impliquerait en effet le remplacement de la logique de commande des convertisseurs [PEC] par un modèle d'une nouvelle génération ainsi que le remplacement partiel de la régulation des moteurs de traction, y c. l'homologation des logiciels ad hoc.)

Dans l'ensemble, l'optimisation de la traction des véhicules permet de réaliser des économies d'environ 3,3%. Si l'on considère la prestation kilométrique indiquée dans le document [4], il serait possible d'économiser entre 15 et 30 MWh par an et par véhicule.

3.3.2. Adaptation des courbes caractéristiques de traction et de freinage du manipulateur de traction/freinage

La programmation actuelle du manipulateur de traction/freinage des véhicules FLIRT est défavorable d'un point de vue énergétique. Que ce soit en cours de marche ou lors d'un freinage, le déport latéral est proportionnel à l'effort appliqué (effort de traction ou de freinage). Par conséquent, il est difficile d'influer sur l'utilisation du frein pneumatique, notamment si le temps de parcours est relativement court. En outre, une accélération à des vitesses supérieures – même en cas d'effort de traction réduit – génère d'importantes pertes de traction qui pourraient être évitées.

Il est possible d'adapter les courbes caractéristiques associées au manipulateur de traction/freinage en fonction de la vitesse, de manière à supprimer ces deux inconvénients. La conduite des véhicules FLIRT s'effectue alors de manière analogue à celle des trains duplex Regio, pour lesquels ce concept a fait ses preuves.

L'estimation de l'impact de ces mesures sur la consommation énergétique repose sur des simulations et des hypothèses liées à la conduite des trains. Selon ces hypothèses, les mécaniciens de locomotive appliqueraient déjà, de par leur conduite, la moitié environ des mesures d'économie théoriquement réalisables.

La modification des courbes caractéristiques de traction et de freinage du manipulateur de traction/freinage renforce l'efficacité énergétique à hauteur de 5%. Si l'on considère la prestation kilométrique indiquée dans le document [4], et une utilisation des véhicules comparable à l'utilisation actuelle, il serait possible d'économiser entre 22 et 44 MWh par véhicule et par an.

3.3.3. Activation plus rapide du mode veille

À l'heure actuelle, le mode veille est activé au bout de 30 minutes. Or, il serait possible de réaliser d'importantes économies en activant le mode veille immédiatement après la mise hors service du train (cabine de conduite non occupée, portes fermées, éclairage du compartiment voyageurs éteint). Pour l'estimation (sur la base d'un décomptage par sondage des plans de roulement CERES), on est parti du principe que le mode veille était activé 550 fois par train par an (soit 1 fois et demie par jour).

Il est impossible d'économiser davantage d'énergie au niveau de la désactivation du mode veille, étant donné que c'est le mécanicien qui s'en charge lorsqu'il rentre dans la cabine de conduite; elle a donc, d'ores et déjà, lieu au dernier moment.

L'optimisation des critères d'activation du mode veille permettrait d'économiser l'équivalent de 14 kWh à chaque utilisation. Si l'on part du principe que le mode veille est activé 550 fois par an (soit 1 fois et demie par jour), cela représente une économie annuelle de 7,7 MWh par véhicule et par an. Sur l'ensemble des besoins énergétiques, cela équivaut à 1%.

3.3.4. Déclenchement de services auxiliaires et de consommateurs du circuit des batteries

Diverses économies pourraient être faites concernant les services auxiliaires:

- enraiemment des pertes convertisseurs via la désactivation des convertisseurs des auxiliaires, la mise hors service complète d'un demi-train ou le déclenchement des pompes d'eau de refroidissement;
- réduction des pertes convertisseurs associées au convertisseur statique en abaissant le seuil de resynchronisation en présence d'une tension réseau faible;
- diminution de la durée de fonctionnement des compresseurs via l'adaptation des seuils d'enclenchement et de déclenchement et la réduction de la consommation en air du bioréacteur;
- limitation de la durée de fonctionnement des ventilateurs via l'adaptation de la courbe caractéristique pour permettre une température de l'eau de refroidissement plus élevée.

Il est recommandé de modifier les courbes caractéristiques et les seuils de commutation des compresseurs et des ventilateurs dans le logiciel des véhicules et d'ajuster le seuil de resynchronisation du convertisseur statique. Il est

recommandé de prévoir le déclenchement d'un demi-train, ce qui nécessite toutefois des clarifications plus poussées. En revanche, il est déconseillé de déclencher un convertisseur de bord.

La plupart des consommateurs du circuit des batteries sont d'ores et déjà déclenchés ou doivent rester en mode veille. En théorie, on pourrait également optimiser la consommation d'énergie des équipements de l'appareil d'arrêt automatique des trains, de la radio et des dispositifs de mesure de la vitesse. Mais dans la mesure où cela impliquerait la mise en place d'éléments d'enclenchement (relais/contacteurs) sur l'ensemble des trains, cette option est jugée intéressante.

Au total, le déclenchement de services auxiliaires permettrait de réduire la consommation d'énergie de 24 à 28 MWh par véhicule et par an, ce qui représente donc une économie de 3 ou 4% par an.

3.3.5. Adaptation de la commande CVC

La commande des installations CVC (chauffage, ventilation, climatisation) en mode veille est d'ores et déjà jugée optimale. Seule la courbe caractéristique du protecteur thermique pourrait éventuellement être adaptée, de manière à ce que l'activation du protecteur soit désormais directement liée à la température extérieure.

Un potentiel d'économie a également été identifié au niveau du mode d'acheminement. Lors de l'acheminement de trains sans passagers, les compartiments voyageurs sont aujourd'hui entièrement climatisés, comme en cas de transport de voyageurs. Il est donc conseillé de maîtriser le fonctionnement des installations CVC dans les compartiments voyageurs selon les mêmes critères que le mode veille (uniquement protection contre le gel ou protecteur thermique) dès la sélection du mode d'acheminement, et ce bien que la cabine soit occupée et le train en service.

L'absence de certaines données-clés ne permet pas de quantifier ces économies d'énergie.

3.3.6. Ensemble des économies d'énergie et rentabilité

Pour l'estimation des économies associées à la réalisation de toutes les mesures recommandées ci-dessus, les données des CFF concernant le kilométrage total des flottes partielles et les heures de service ont été reprises et arrondies conformément au document [4]. Concernant les véhicules circulant dans plusieurs pays, les heures de service ont été réparties entre les deux pays, en procédant proportionnellement au kilométrage. Les temps correspondant au mode «Marche» comprennent non seulement les temps de parcours ($v > 0$) en exploitation commerciale, mais aussi les trajets de service et les opérations de manœuvre. Les temps d'arrêt en exploitation commerciale sont considérés comme temps d'immobilisation des véhicules.

Au total, l'adaptation des logiciels de la logique de commande du véhicule et du convertisseur pourrait permettre d'économiser env. 75 à 95 MWh par an et par véhicule, selon l'utilisation et la prestation kilométrique.

Les économies pouvant être réalisées grâce aux logiciels de la logique de commande du véhicule et du convertisseur s'élèvent donc au total à 13,5 GWh/an, à condition toutefois que le coût d'homologation des logiciels ainsi modifiés ne soit pas jugé excessif.

Le fabricant des véhicules a fourni des informations sur les coûts induits par les diverses mesures. Les CFF se sont chargés d'évaluer leur rentabilité respective. De grandes divergences ont ainsi pu être constatées compte tenu des différences de taille entre les flottes partielles et des particularités concernant l'homologation des véhicules en Suisse ou à l'étranger. Ainsi, si certaines mesures peuvent être rentabilisées en quelques années seulement (payback statique), d'autres ne peuvent l'être qu'au terme de plusieurs décennies. Les mesures économiques envisagées dans la suite du document ont un seuil de rentabilité compris entre 2 et 11 ans.

3.4. Autres mesures d'économie d'énergie envisagées

Le recours à des transformateurs secs et l'optimisation des caractéristiques aérodynamiques des panneaux de toit ont même été envisagés dans le cadre d'une étude complète de l'efficacité énergétique des véhicules FLIRT visant à repérer tout potentiel d'économie.

3.4.1. Transformateur sec

Seuls les familles de véhicules unisystème FLIRT RegOlten II de la série RABe 523 permettent l'installation d'un transformateur sec. Les transformateurs des flottes partielles FLIRT TILO (RABe 524) ne peuvent pas être conçus comme des transformateurs secs, au même titre que ceux des FLIRT France bi-fréquences (RABe 522). Les simulations (modèles, cycles de charges) corroborent celles des logiciels de traction et permettent d'établir une comparaison directe. La simulation presuppose que les véhicules équipés d'un transformateur sec disposent systématiquement du logiciel de traction optimisé.

Pour un profil d'exploitation moyen, les économies pour un véhicule RABe 523 s'élèvent à 93 MWh par an pour un kilométrage annuel de 180 000 km.

3.4.2. Optimisation des caractéristiques aérodynamiques des panneaux de toit

Dans le cas des trains FLIRT, il est possible d'ôter les panneaux de toit latéraux (par analogie aux trains du type FLIRT 3) ou de recouvrir intégralement le toit et l'ensemble des appareils qui y sont installés. La société emkamatik a effectué des simulations pour ces deux variantes. Néanmoins, les résultats obtenus ne peuvent donner qu'un aperçu de l'effet escompté. Par ailleurs, les simulations reposent sur des estimations approximatives de la résistance aérodynamique des surfaces transversales et longitudinales (et non pas sur des programmes détaillés de simulation aérodynamique). Compte tenu de la complexité des équipements installés sur le toit, seule la réalisation de mesures permettrait de disposer de données plus précises. D'après la simulation, l'optimisation aérodynamique permettrait d'économiser 21 MWh par an et par véhicule pour la variante sans panneaux de toit et 12 MWh par an et par véhicule pour la variante avec recouvrement intégral.

Lors de la réunion du 26 janvier 2016, des arguments partiellement contradictoires concernant le démontage de panneaux de toit ont été avancés (certaines mesures auraient même permis d'identifier des besoins supplémentaires). Par conséquent, la société Stadler recommande aux CFF d'effectuer des courses de mesure avec et sans panneaux de toit pour déterminer le potentiel d'économie sous-jacent.