



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)

Stromverbrauchsmessung bei nicht interoperablen Bahnen

Schlussbericht

Martin Aeberhard, Railectric GmbH

Wankdorffeldstrasse 88, 3014 Bern, martin.aeberhard@railectric.com, www.railectric.com

Begleitgruppe

Olivier Augé, TPG

André Bieri, RhB

Michael Ryf, RBS

Hermann Willi, BAV

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

CH-3003 Bern

Programmleiter

Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: P-190

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor –in oder sind ausschliesslich die Autoren – innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 02.10.2020

Inhalt

| | |
|---|----|
| Executive Summary | 5 |
| Zusammenfassung | 6 |
| Resumée | 7 |
| 1 Einleitung, Ziel der Studie..... | 8 |
| 1.1 Ausgangslage | 8 |
| 1.2 Ziele der Studie und abgeleitete Fragestellungen | 8 |
| 2 Begriffsdefinitionen | 10 |
| 3 Vorgehensweise | 11 |
| 4 Zusammenfassung Stand bei ausgewählten, nicht interoperablen Bahnbetrieben | 14 |
| 4.1 Verkehrsbetriebe Zürich VBZ | 14 |
| 4.2 Rhätische Bahn RhB | 17 |
| 4.3 Regionalverkehr Bern – Solothurn RBS | 19 |
| 4.4 Transports de Martigny et Régions TMR | 21 |
| 4.5 Matterhorn Gotthard Bahn MGB..... | 22 |
| 4.6 ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe AG | 23 |
| 4.7 moBiel Bielefeld | 25 |
| 4.8 Verkehrsbetriebe Karlsruhe VBK..... | 27 |
| 5 Kosten von fahrzeugseitigen Energiezählern | 28 |
| 5.1 Energiezähler..... | 28 |
| 5.2 Energiemessung in der normalen Leittechnik | 28 |
| 5.3 Wirtschaftlichkeit..... | 28 |
| 6 Zwischenfazit..... | 30 |
| 7 Welche Energiesparmassnahmen erfordern welche Mess- und Registrierungssysteme | 31 |
| 8 Genauigkeit von Messsystemen..... | 33 |
| 8.1 Ausgangslage | 33 |
| 8.2 Rückmeldungen von Betreibern | 33 |
| 8.3 Empfehlungen zur Messgenauigkeit | 34 |
| 9 Vorschlag einer gemeinsamen Datenstruktur | 37 |
| 10 Empfehlungen..... | 38 |
| 10.1 Übersicht | 38 |
| 10.2 Realisierung einer Energiemess-Funktion mit vorhandenen Messwandlern und Leittechnik bei Neufahrzeugen | 38 |
| 10.3 Nachrüstung bestehender Flotten nach Bedarf | 38 |
| 10.4 Keine Ausrüstung der Fahrzeuge nicht interoperabler Bahnen mit Energiezählern | 39 |

| | | |
|------|---|----|
| 10.5 | Standardisierung der Datenformate | 39 |
| 10.6 | Festlegung der Anforderungen an die Genauigkeit der Energiemess-Systeme | 40 |
| 11 | Abschliessende Überlegungen der Autoren | 41 |
| | Literaturverzeichnis | 42 |
| | Anhang | 43 |
| | Anhang 1, Standard-Fragebogen an die Betreiber der Referenz-Netze | 43 |
| | Anhang 2, Energiesparpotentiale ausgewählter Massnahmen | 44 |

Executive Summary

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel abzuklären, welche Systeme zur Erfassung des Energieverbrauchs, insbesondere auf den Fahrzeugen, bei nicht interoperablen Bahnen in der Schweiz umgesetzt werden sollten. Ziel ist es, mit solchen Mitteln die Bestrebungen zur Reduktion des Energieverbrauchs zu unterstützen. Aufgrund von Gesprächen mit betroffenen Betrieben unterschiedlicher Ausprägung, sowie theoretischer Überlegungen gelangt die Studie zum Schluss, dass die auf modernen Fahrzeugen vorhandene Leittechnik alle Voraussetzungen erfüllt, um mit geringem Aufwand eine zweckmässige Ermittlung des Energieverbrauchs, die aber nicht dem Ziel der Verrechnung dient, realisieren zu können. Dadurch erübrigt sich der Einbau von eigentlichen Energiezählern.

L'objectif de cette étude était d'analyser quels systèmes d'enregistrement de la consommation d'énergie, en particulier sur les véhicules, devraient être mis en œuvre en Suisse pour les chemins de fer non interoperables. L'objectif est de soutenir, par la mise en place de tels systèmes, les efforts visant à réduire la consommation d'énergie. Sur la base de discussions avec les entreprises concernées de différents types, ainsi que de considérations théoriques, l'étude arrive à la conclusion que la technologie de contrôle disponible sur les véhicules modernes remplit toutes les exigences préalables pour pouvoir réaliser une détermination ciblée de la consommation d'énergie avec peu d'efforts, mais qui ne sert pas l'objectif de la facturation de l'énergie. Cela rend inutile l'installation de véritables compteurs d'énergie.

The aim of this paper was to clarify which systems for recording energy consumption, especially on the vehicles, should be implemented in Switzerland for non-interoperable railways. The aim is to support efforts to reduce energy consumption by such means. On the basis of discussions with affected companies of various types, as well as theoretical considerations, the study comes to the conclusion that the control technology available on modern vehicles fulfils all the prerequisites to be able to realise a purposeful determination of energy consumption with little effort, which, however, does not serve the objective of billing. This makes the installation of actual energy meters unnecessary.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel abzuklären, welche Systeme zur Erfassung des Energieverbrauchs, insbesondere auf den Fahrzeugen, bei nicht interoperablen Bahnen in der Schweiz umgesetzt werden sollten. Oberstes Ziel dabei ist, dass solche Systeme die Betreiber der genannten Bahnen auf wirtschaftliche Weise in ihren Bemühungen unterstützen sollen, den Energieverbrauch zu senken.

Mit einer repräsentativen Anzahl betroffener Betreiber wurde der Stand der vorhandenen Technik und deren aktuelle Umsetzung in mehreren Fachgesprächen abgeholt und an denkbaren Massnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs beurteilt.

Es zeigt sich rasch, dass es möglich ist, mit auf den Fahrzeugen ohnehin vorhandenen Messwandlern und der ohnehin vorhandenen Leittechnik Energie-Messsysteme ohne zusätzliche Hardware zu realisieren, welche alle Bedürfnisse zur Unterstützung bei der Umsetzung von Energiesparmassnahmen abdecken können. Auf einigen der neueren Fahrzeugflotten sind diese Systeme bereits serienmässig installiert, auf einigen zumindest vorbereitet.

Umgekehrt konnte aber weder aufgrund theoretischer Überlegungen, noch aufgrund der Erfahrungen bei den kontaktierten Betreibern ein Mehrnutzen von zusätzlichen Energiezählern ausgemacht werden, welcher den Mehraufwand rechtfertigen würde.

Die Studie kommt zum Schluss, dass eine Ausrüstung der Fahrzeuge nicht interoperabler Bahnen mit Energiezählern nicht empfohlen werden kann. Die Umsetzung rein softwaremässiger Energiemesssysteme unter Nutzung der vorhandenen Hardware ist jedoch sinnvoll. Das Handling der Systeme und der damit gewonnenen Daten sollte den Betreibern überlassen sein.

In zwei Bereichen kommt die Studie zum Schluss, dass eine gewisse Standardisierungsarbeit zu empfehlen ist: Zum einen wäre es sinnvoll, eine standardisierte Vorgabe an die Genauigkeit der Energiemessung mit den beschriebenen Systemen zu machen. Da die Systeme nicht der Energieverrechnung dienen, müssen die Genauigkeits-Anforderungen aber nicht gleich hoch sein wie bei Energiezählern. Zum andern wird das Festlegen von gemeinsamen Datenformaten von den meisten Betreibern als sinnvolles Ziel anerkannt.

Dank

Die Verfasser der vorliegenden Studie danken den Betrieben, welche sich an den Umfragen und/oder in der Begleitgruppe engagiert haben bestens für ihre wertvollen Auskünfte, Ideen und Anregungen!

Resumé

L'objectif de cette étude était de clarifier quels systèmes de mesure et d'enregistrement de la consommation d'énergie, en particulier sur les véhicules, devraient être mis en œuvre en Suisse pour les chemins de fer non interopérables. L'objectif principal est que ces systèmes soutiennent les opérateurs des chemins de fer mentionnés, de manière économique, dans leurs efforts pour réduire la consommation d'énergie.

Les technologies disponibles et leur mise en œuvre actuelle ont été discutés avec un nombre représentatif d'opérateurs concernés lors de plusieurs réunions techniques et évalués en termes de mesures envisageables pour réduire la consommation d'énergie.

Il est rapidement apparu qu'il est possible de mettre en œuvre des systèmes de mesure de l'énergie sans matériel supplémentaire en utilisant les transformateurs de mesure déjà installés sur les véhicules et la technologie de contrôle déjà disponible, et que ces systèmes peuvent couvrir tous les besoins d'aide à la mise en œuvre de mesures d'économie d'énergie. Sur certains des parcs de véhicules les plus récents, ces systèmes sont déjà installés en série, sur certains au moins préparés.

Inversement, cependant, ni les considérations théoriques ni l'expérience des opérateurs contactés n'ont permis d'identifier un quelconque avantage supplémentaire des compteurs d'énergie supplémentaires qui justifierait la dépense supplémentaire.

L'étude arrive à la conclusion qu'il ne peut être recommandé d'équiper les véhicules des chemins de fer non interopérables de compteurs d'énergie. Toutefois, la mise en œuvre de systèmes de comptage de l'énergie purement logiciels utilisant le matériel existant est judicieuse. La manipulation des systèmes et des données ainsi obtenues doit être laissée aux opérateurs.

Dans deux domaines, l'étude conclut qu'un certain travail de normalisation est recommandé : d'une part, il serait utile de faire une spécification normalisée concernant la précision de la mesure de l'énergie avec les systèmes décrits. Cependant, comme les systèmes ne sont pas utilisés pour la facturation de l'énergie, les exigences de précision ne doivent pas être les mêmes que pour les compteurs d'énergie. D'autre part, la définition de formats de données communs est reconnue par la plupart des opérateurs comme un objectif raisonnable.

Remerciement

Les auteurs de cette étude tiennent à remercier les entreprises qui ont participé aux enquêtes et/ou au groupe d'accompagnement pour leurs précieuses informations, idées et suggestions !

1 Einleitung, Ziel der Studie

1.1 AUSGANGSLAGE

Gemäss Pflichtenheft des Auftraggebers für diese Studie gestaltet sich die Ausgangslage wie folgt:

Die 2017 eingeführte verbrauchsabhängige Verrechnung des Bahnstroms auf dem Normalspurnetz gibt Eisenbahnunternehmen einen ökonomischen Anreiz, ihre Energieeffizienz zu verbessern. Tatsächlich haben sie bereits verschiedene Massnahmen dazu umgesetzt, etwa Eco-Drive-Schulungen für Lokführer, eine Verbrauchsanzeige im Führerstand und vor allem die adaptive Lenkung (ADL). Weitere Massnahmen, teilweise mit Unterstützung des Programms ESöV 2050, sind in Bearbeitung.

Etwa ein Viertel des schweizerischen Eisenbahnnetzes ist nicht als Normalspur ausgeführt und untersteht nicht dem offenen Netzzugang. Die Eisenbahnbetreiber sind gesetzlich nicht verpflichtet, ihren effektiven Energieverbrauch zu erfassen und abzurechnen. Damit fällt ein wichtiger Anreiz weg, Massnahmen zur Verminderung des Energieverbrauchs zu suchen und umzusetzen. Ein grosser Teil der von Normalspurbahnen bekannten Massnahmen liessen sich aber auf Meterspurbahnen, Schmalspurbahnen und Trams (im Folgenden als nicht interoperable Bahnen bezeichnet) übertragen.

Auch ohne Verrechnung des effektiven Energieverbrauchs könnte die fahrzeugseitige Erfassung für die nicht interoperablen Bahnen attraktiv sein, da sie die Daten liefert, welche notwendig sind, um Energieeffizienzmassnahmen abzuleiten. Diese können betrieblicher Art sein (z.B. Fahrplangestaltung, Fahrempfehlungen, individueller Fahrstil des Lokpersonals) oder technische Anpassungen an den Fahrzeugen nach sich ziehen (z.B. Verbesserung der Rekuperationsleistung, Steuerung von Hilfsgeräten, Ersatz von Komponenten durch effizientere Ausführungen).

1.2 ZIELE DER STUDIE UND ABGELEITETE FRAGESTELLUNGEN

Gemäss Pflichtenheft soll die Studie folgende Ziele erreichen:

- a) Die Betreiber nicht interoperabler Bahnen erhalten Empfehlungen für eine kostengünstige, aussagekräftige Messung und Analyse des effektiven Energieverbrauchs ihrer Fahrzeuge sowie einen Katalog von daraus abgeleiteten Massnahmen für einen energieeffizienten Betrieb.
- b) Das BAV verfügt über die nötigen Informationen, um die betriebliche und technische Machbarkeit sowie die Kosten und potenziellen Einsparungen einer Verbrauchserfassung beurteilen zu können.

In anderen Worten geht es also darum festzustellen, ob bei nicht interoperablen Bahnen Systeme zur fahrzeugseitigen Erfassung des Energieverbrauchs

- bereits vorhanden, wenn ja in welchen Fällen mit welchen Zielen
- erwünscht bzw. nicht erwünscht sind
- welche Ziele mit welchen Systemen / Ansätzen erreicht werden könnten
- daraus umsetzbare Empfehlungen abzuleiten.

Dabei sind insbesondere folgende Fragen zu klären:

- Wo soll der Energieverbrauch gemessen und registriert werden?
 - Auf allen Fahrzeugen, oder nur punktuell / stichprobenweise
 - Nur auf modernen Fahrzeugen, wo die Erfassung in der Leittechnik einfach möglich ist, oder auch auf älteren Fahrzeugen, wo möglicherweise auch Hardware nachgerüstet werden müsste?
 - An welchen Stellen in der Infrastruktur, z.B. im Hinblick auf streckenspezifische Auswertungen?
- Ist eine zentralisierte Datenerfassung und Auswertung gerechtfertigt, oder genügen punktuelle Auswertungen?
- Falls eine zentralisierte Datenerfassung und Auswertung gerechtfertigt ist, mit welchen technischen Mitteln soll diese erfolgen?

Als Ziel der Studie soll ein nachvollziehbarer Vorschlag entstehen, welche Massnahmen bzw. welche Systeme auf den Fahrzeugen vorgesehen werden sollen. Die entsprechenden Empfehlungen, sowie einige weitere Vorschläge, sind im Kapitel 0 zu finden.

2 Begriffsdefinitionen

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird grundsätzlich unterschieden zwischen den beiden folgenden möglichen Ausgestaltungen von Systemen zur Erfassung des Energieverbrauchs auf den Triebfahrzeugen:

- Unter dem Begriff «**Zähler**» bzw. «**Energiezähler**» wird ein unabhängiges System verstanden, welches auch für die Verrechnung der Energiekosten verwendet werden kann. Derartige Systeme sind heute in der Regel auf den Triebfahrzeugen interoperabler Bahnen eingebaut. Solche Systeme müssen gemäss der Norm EN50463-2 [2] gebaut und validiert sein. In der Regel zeichnen sich diese Systeme aus durch:
 - Eine von der übrigen Leittechnik des Fahrzeugs unabhängige Erfassungs- und Auswerteeinheit
 - Entweder durch eigene Strom- und Spannungswandler; falls Strom- und Spannungswandler verwendet werden, deren Signale auf dem Fahrzeug noch für andere Zwecke genutzt werden (z.B. für Regelung und Schutz), müssen diese Wandler ebenfalls den Anforderungen gemäss EN50463-2 genügen.
 - Unabhängiger Datenkanal zur Übermittlung der Energiemessdaten, in der Regel an die Stelle der Infrastruktur, an welcher die Energie-Verrechnung vorgenommen wird.
- Unter dem Begriff «**Energiedatenerfassung bzw. Energiemessung in der Leittechnik**» werden Systeme verstanden, bei welchen die auf dem Fahrzeug ohnehin vorhandene Leittechnik mit einer Softwarefunktion ergänzt wird, welche aufgrund der Strom- und Spannungsmesswerte die Energie für eine bestimmte Fahrt, Strecke oder einen Zeitabschnitt berechnen kann. Es werden die Signale aus den ohnehin vorhanden Strom- und Spannungswandlern verwendet. Die erfassten Daten werden in der Regel als Diagnosedaten auf dem Fahrzeug abgespeichert und auch mit den Diagnosedaten ausgelesen bzw. übermittelt. Bisher existieren für derartige Systeme keine standardisierten Genauigkeits-Anforderungen, siehe auch Kapitel 0.

3 Vorgehensweise

Beim Erarbeiten dieser Studie wurde wie folgt vorgegangen:

1. Im ersten Schritt sollte ein möglichst umfassendes Bild gewonnen werden, welche Energiemesssysteme bei den nicht interoperablen Bahnen bereits vorhanden, geplant oder zumindest angedacht sind, und welche Erwartungen die Betreiber an solche Systeme haben.
Parallel dazu wurde durch Studium des Berichts [1] und durch ein vertieftes Gespräch mit dessen Verfasser auch der aktuelle Stand der Energiemessung und des Zähler-Einbaus in die Fahrzeuge der SBB, also eines grossen interoperablen Betriebes, abgeholt.
Die Ergebnisse dieses Schrittes sind in den Kapiteln 0 bis 0 dokumentiert.
2. In einem zweiten Schritt wurde für eine Anzahl denkbarer Massnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs überlegt, welche Messausrüstung Fahrzeug- und/oder Infrastruktur-seitig sinnvoll ist, um die erforderlichen Nachweise zu liefern und um Rückmeldungen in die (Weiter)-Entwicklung der Massnahmen zu geben.
Die Ergebnisse sind im Kapitel 0 dokumentiert.
3. Im Rahmen der teils recht umfangreichen Gespräche mit verschiedenen Betreibern nicht interoperabler Bahnen wurden zwei Themenbereiche identifiziert, bei welchen es nach Ansicht der Autoren sinnvoll wäre, weitere Grundlagen für die Energiemessung in der Leittechnik zu schaffen.
Die entsprechenden Überlegungen sind in den Kapiteln 0 (Anforderungen an die Genauigkeit) und 0 (standardisierte Datenstruktur) zu finden.

Weil es im Rahmen dieser Studie nicht möglich war, auf jede betroffene Bahn einzeln einzugehen, wurden die in der Tabelle 1 beschriebenen vier Kategorien gebildet. Das Ziel bestand darin, mit vertieftem Einblick in jeweils nur einen Betrieb pro Kategorie einen repräsentativen Einblick in die Situation und Bedürfnisse eines Grossteils der nicht interoperablen Bahnen zu erlangen.

| Nr. | Kategorie | Einige Merkmale | Ausgewählte Referenznetze / -betreiber |
|-----|--------------------------------------|---|--|
| 1. | Tramnetz | <ul style="list-style-type: none"> • Sehr dichter Fahrplan. • Es wird erwartet, dass ein grösserer Anteil der beim Bremsen rekuperierten Energie von anderen Fahrzeugen aufgenommen werden kann. • Fahrweise zu einem grossen Teil fremdbestimmt (Strassenverkehr, Fussgänger). | <ul style="list-style-type: none"> - VBZ Zürich - ÜSTRA, Hannover (D) - moBiel, Bielefeld (D) - VBK, Karlsruhe (D) |
| 2. | DC-Bahn mit S-Bahn-ähnlichem Verkehr | <ul style="list-style-type: none"> • Dichter Fahrplan. • Es wird erwartet, dass ein relativ grosser Anteil der beim Bremsen rekuperierten Energie von anderen Fahrzeugen aufgenommen werden kann (aber weniger als bei Tramnetzen). • Betriebliche Optimierung in gewissen Grenzen denkbar (energie-optimierte Fahrprofile). | <ul style="list-style-type: none"> - RBS, Regionalverkehr Bern - Solothurn |
| 3. | DC-Bergbahn | <ul style="list-style-type: none"> • Grosse Höhendifferenzen, es kann grundsätzlich viel potentielle Energie rekuperiert werden. • Geringe Fahrplandichte, die Möglichkeit, rekuperierte Energie durch andere Züge zu nutzen ist eingeschränkt. • Betriebliche Optimierung schwierig, weil die zulässigen Geschwindigkeiten aus Sicherheitsgründen tief sind und in der Regel ausgefahren werden müssen. Umgekehrt können aber betriebliche Schwierigkeiten (Signalhalte) eher vermieden werden als bei Bahnen mit dichterem Verkehr, ausserdem wirken sie sich wegen den tiefen Geschwindigkeiten weniger negativ aus auf den Energieverbrauch. | <ul style="list-style-type: none"> - TMR; Transports de Martigny et Régions. |
| 4. | AC-Bahn | <ul style="list-style-type: none"> • Verhältnisse trotz anderer Spurweite ähnlich wie bei den interoperablen Bahnen. • Rekuperation nahezu immer ohne Einschränkungen möglich. • Übernahme von Massnahmen analog dem interoperablen Netz kann aufgrund der dort gemachten Erfahrungen beurteilt werden. | <ul style="list-style-type: none"> - RhB, Rhätischen Bahn - MGB, Matterhorn Gotthard Bahn |

Tabelle 1 Für die Studie festgelegte Kategorien nicht interoperabler Bahnen

Als repräsentative Netze wurden vorgeschlagen und ausgewählt:

- Tramnetz: VBZ Zürich
- Gleichstrombahn mit S-Bahn-Verkehr: RBS, Regionalverkehr Bern - Solothurn
- Bergbahn mit Gleichstrom: Strecke Martigny – Châtelard der TMR; Transports de Martigny et Régions.
- Nicht interoperable Wechselstrombahn: RhB, Rhätischen Bahn

Ergänzend wurde zudem die Matterhorn Gotthard Bahn (MGB) einbezogen.

Zusätzlich konnte der Stand der Aktivitäten im Zusammenhang mit der Energiemessung, der Massnahmen und Erwartungen an Energiemesssysteme bei drei ausländischen Stadtbahn-Betreibern in Erfahrung gebracht werden:

- ÜSTRA, Hannover
- moBiel, Bielefeld
- VBK, Karlsruhe.

Die Auswahl dieser Betriebe erfolgte nicht über technische Kriterien. Es wurden Betriebe angefragt, zu denen über Mitglieder der Begleitgruppe bereits Kontakte bestanden.

Im vorliegenden Bericht sind die Erkenntnisse aus diesen teilweise in Gesprächen, teilweise schriftlich eingeholten Informationen im Kapitel 0 dokumentiert. Im Kapitel 0 werden die Gemeinsamkeiten der bereits existierenden Lösungen herausgearbeitet, sowie ein Vorschlag gemacht, welche Energiemess-Lösungen für welche denkbaren Energiesparmassnahmen geeignet sein könnten.

4 Zusammenfassung Stand bei ausgewählten, nicht interoperablen Bahnbetrieben

4.1 VERKEHRSBETRIEBE ZÜRICH VBZ

4.1.1 Erfassung des Energieverbrauchs

Die VBZ betreiben in der Stadt und Agglomeration Zürich ein Strassenbahnnetz mit einer kumulierten Länge der Tramlinien von 122.7 km (2018), und einer gesamten Gleislänge mit Betriebsgleisen vom 168 km¹. Interessant ist, dass das Netz der VBZ Linien mit sehr unterschiedlichen Charakteristiken, von Linien mit kaum nennenswerter Neigung bis zu solchen mit Bergbahn-Charakter aufweist.

Die VBZ haben auf der ganzen Flotte *Cobra* sowie auf den in der Inbetriebnahme befindlichen *Flexity*, nicht jedoch auf den älteren *Tram 2000*, in der Leittechnik eine Funktion zur Erfassung des Energieverbrauchs implementiert. Das System stützt sich auf die für die Traktion ohnehin vorhandenen Spannungs- und Stromwandler und die Fahrzeug- und Antriebsleittechnik ab, es ist also ausschliesslich eine Zusatz-Software, **ohne zusätzliche Hardware**. Die VBZ verfolgen mit diesen Systemen das Ziel, den Verbrauch sichtbar zu machen.

Die mit dem System ermittelten Daten dienen ebenso den Ecodrive-Schulungen, wie auch dem Engineering im Hinblick auf technische Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz (mehr dazu weiter unten).

4.1.2 Anzeigen, Auslesen und Auswertung der Messdaten

Ecodrive: Die Energiedaten werden bei den VBZ unpersonifiziert erfasst. Das Ziel besteht im Teamerfolg, nicht im Erfolg des Einzelnen. Hauptziel der Ecodrive-Schulungen ist die Sensibilisierung auf eine vorausschauende Fahrweise. Die VBZ rechnen im Bereich Tram mit einer Energie-Einsparung von ca. 1%. Erste Auswertungen dazu sollten im August 20 vorliegen.

Nebst der Möglichkeit, die Energiedaten im Führerstand anzuzeigen werden die Daten täglich automatisch im Depot ausgelesen (1 File pro Tag und Fahrzeug). Die Daten werden gemeinsam mit den Diagnosedaten ausgelesen. Darüber hinaus ist es auch möglich, das System für gezielte Tests zu nutzen. Zur Zeit wird durch das System nur der Energieverbrauch im produktiven Fahrgastbetrieb erfasst, nicht jedoch der Verbrauch während der Abstellung.

Für die Anzeige im Führerstand kann das Fahrpersonal den Zähler selbst zurücksetzen und

¹ https://de.wikipedia.org/wiki/Strassenbahn_Zürich, Stand Juni 2020

damit bestimmen, ob die Anzeige für eine bestimmte Fahrt oder z.B. für den ganzen Tageseinsatz erfolgen soll.

4.1.3 Datenformate und -qualität

Die VBZ stehen dem Vorschlag einer Standardisierung der Energie-Datenformate positiv gegenüber. Ein Beispiel-Datensatz von einem *Cobra* wurde zur Verfügung gestellt. Es ist allerdings zu beachten, dass ein primärer Designfaktor die geringe Datenspeicherkapazität des älteren *Cobra* Trams war. Bei der Leittechnik neuerer Fahrzeuge besteht diese Einschränkung nicht mehr.

4.1.4 Aufwand und Kosten

Die VBZ geben den Aufwand für die Systementwicklung beim *Cobra* wie folgt an: Software-Entwicklung *Cobra* ca. 35 kFr, Ausrollen 88 mal à 4h; Engineering 15x8h. Beim *Flexity* war die Funktion von Anfang an im Lastenheft gefordert, deshalb entsteht kein explizit ausweisbarer Zusatzaufwand.

4.1.5 Umgesetzte oder in Erwägung gezogene Energiesparmassnahmen

Die folgenden Einspar-Potentiale wurden mit den VBZ diskutiert:

Abstellung der Züge, Schlummerbetrieb

Abstellung innerhalb von Gebäuden: Kein Schlummerbetrieb, die Fahrzeuge werden mit gesenktem Stromabnehmer abgestellt.

Abstellung draussen: Schlummerbetrieb ist vorhanden. Es ist nicht klar, ob dieser hinsichtlich Energie-Effizienz noch weiter optimiert werden könnte.

Optimierung Gefässgrösse

Bei der zukünftigen Flotte mit *Cobra* und *Flexity* nicht mehr möglich. Falls es zwischen diesen Flotten Unterschiede in der Energieeffizienz gibt wäre allenfalls denkbar, in Randzeiten vermehrt die effizientere Flotte einzusetzen.

Technische Optimierungen Fahrzeug

Denkbar im Rahmen des Midlife-Refurbishment der *Cobra* in ca. 7 Jahren. Konkrete Pläne gibt es noch keine.

Fahrweise (Ecodrive, Einsatz Rekuperationsbremse)

Siehe oben.

Rückspeisefähige Unterwerke bei DC-Bahnen, Energiespeicher fest installiert

Zurzeit keine Projekte bei VBZ.

Energiespeicher auf den Fahrzeugen

Zurzeit keine Projekte bei VBZ im Bereich Tram (jedoch bei den Trolleybussen). Wichtig ist aus Sicht VBZ eine gesamtheitliche Betrachtung, d.h. nebst allenfalls vermehrter Nutzung von Rekuperations-Energie ist auch der Einfluss des Mehrgewichtes und der grauen Energie in den Batterien zu berücksichtigen.

Fahr-Assistenzsysteme

Der Fokus bei solchen Systemen für Strassenbahnen liegt derzeit mehr bei Systemen zur Verhinderung von Kollisionen (insbesondere mit Fussgängern).

Auf übergeordneter Ebene gibt es bei den VBZ Überlegungen für Systeme mit dem Ziel Regelmässigkeit statt Pünktlichkeit. Damit soll vor allem die Paket-Bildung verhindert werden.

Geregelte Spannung bei Unterwerken DC-Bahnen

Derzeit kein Thema bei den VBZ.

Anpassungen Heiztemperatur, Kühltemperatur

Heute gibt es für Heizen und Kühlen Kurvenscharen, welche die Sollwerte für die Innentemperatur in Funktion der Aussentemperatur definieren. Jede Kurve gilt für einen Zielwert (z.B. 20°C), der Sollwert ist dann aber nicht konstant 20°C, sondern variiert in Abhängigkeit von der Aussentemperatur. Bei der Wahl der Zielwerte kann ein gewisser Konflikt zwischen den Zielen Energieeffizienz und Komfort bestehen. Allerdings ist dieser beim Stadtverkehr zu relativieren. Es kann zum Beispiel sein, dass es für die Tramfahrgäste im Winter angenehmer (und AUCH energieeffizienter) wäre, weniger zu heizen, weil sie ihre Winterjacken nicht ausziehen müssen, wenn sie in ein warmes Tram einsteigen. Oft sind die Fahrgäste nicht lange im Tram und es ist unangenehm, wenn das Tram zu warm ist.

Die VBZ würden es sehr begrüssen, wenn das BAV diesbezüglich verbindliche Vorgaben machen würde.

Wahrscheinlich sind separate Vorgaben für den Stadtverkehr (Trams und Busse) und den Intercity-Verkehr (Züge) wünschenswert.

Bessere Vermaschung Fahrleitungsnetz

Diesbezüglich ist das Potential bei den VBZ ausgeschöpft.

Erhöhung der Rekuperations-Spannung

Zur Zeit nicht geplant. Eine Erhöhung würde auf jeden Fall voraussetzen, dass alle im Netz verkehrenden Fahrzeuge und auch alle der Fahrleitungsspannung ausgesetzten Infrastruktur-Elemente diese höhere Spannung ertragen können.

Vorrangsteuerung bei Ampeln

Ist in Zürich weitgehend umgesetzt, ausser bei Kreuzungen mit Kantonsstrassen.

4.2 RHÄTISCHE BAHN RHB

4.2.1 Erfassung des Energieverbrauchs

Für neue Fahrzeuge wurde eine Software entwickelt, welche pro Fahrt, d.h. pro Zugnummer, die aufgenommene Energie und die rückgespeiste Energie erfasst. Die Funktion wurde überprüft; allerdings wurde das System nach Protest des Lokpersonals nie serienmässig implementiert.

Der Energieverbrauch würde nur bei der Fahrt erfasst (Zugnummer!), der Energieverbrauch abgestellter Züge würde beim derzeitigen Entwicklungsstand nicht erfasst.

Das wichtigste Ziel einer solchen Einrichtung besteht aus Sicht der RhB darin, den Verbrauch sichtbar zu machen. Allerdings beschränkt sich der Nutzen aus Sicht RhB auf den meisten Strecken drauf, die Auswirkungen des Einsatzes der elektrischen Bremse aufzuzeigen. Hier besteht vor allem bei lokbespannten Zügen, bei welchen die pneumatische und die elektrische Bremse unabhängig voneinander bedient werden, noch Potential, deren Anteil am gesamten Verkehrsvolumen nimmt aber ab. Bei den neusten Triebzügen lässt das Bedienkonzept der Bremse dem Lokführer kaum mehr Spielraum. Dadurch soll eine maximale Rekuperation der Bremsenergie garantiert werden.

Eine Optimierung der Geschwindigkeitsprofile bringt nach Einschätzung der RhB auf deren Netz kaum etwas. Mögliche Ausnahme: Autozüge im Vereinatunnel. Dies erfordert jedoch zwingend eine Verknüpfung mit der Betriebsleitzentrale. Insbesondere sind auf den weitgehend einspurigen Strecken die Kreuzungspunkte ausschlaggebend. Dies ist angedacht (Vereina), die Realisierung offen.

Seitens Infrastruktur existiert eine streckenbezogene Energie-Auswertung. Diese erfolgt aufgrund von Messwerten im Leitsystem, es werden zu diesem Zweck keine speziellen Zähler eingebaut.

4.2.2 Anzeigen, Auslesen und Auswertung der Messdaten

Die Fernauslesung der Daten via WLAN an bestimmten Stellen im Netz ist im Prinzip vorgesehen, wird aber zur Zeit mangels ausgerüsteten Fahrzeugen nicht genutzt. Zukünftig

wäre mit der Einführung von ERP (SAP), zusammen mit den Instandhaltungsdaten, auch das ortsunabhängige Auslesen von Energiedaten möglich.

4.2.3 Datenformate und -qualität

Die Genauigkeit der Energiemessung wird als nicht kritisch betrachtet, da es bei einer nicht-interoperablen Bahn eben nicht um die Energieverrechnung geht, sondern um relative Vergleiche.

4.2.4 Aufwand und Kosten

Die Nachrüstung der neueren Triebfahrzeuge mit diesem System wäre mit geringem Aufwand möglich, wurde aber wegen der erwähnten mangelnden Akzeptanz seitens Lokpersonal bisher nicht realisiert. Die Aufwandschätzung beläuft sich auf: Software-Entwicklung für bestehende Triebfahrzeuge 20 kFr. Ausrollen 1000 bis 5000 Fr. pro Fahrzeug.

Die Nachrüstung älterer Fahrzeuge wäre nach Auffassung der RhB zu aufwendig.

4.2.5 Umgesetzte oder in Erwägung gezogene Energiesparmassnahmen

Verbesserungen bei abgestellten Zügen (Schlumberbetrieb, Zugvorheizung) ist der Spielraum bei der RhB sehr eingeschränkt, weil die schwache Zugsammelschiene (300 V) ein Vorheizen nach einer Schlumberphase praktisch ausschliesst (Überlast). Bei neuen Triebzügen ist der Schlumberbetrieb ohnehin vorgesehen.

Auf der Berninastrecke (DC) besteht sicher ein Potential durch den Einsatz rückspeisefähiger Unterwerke. Mit zunehmender Zugsdichte kann die rekuperierte Energie aber auch vermehrt von anderen Zügen genutzt werden. Spannungsregulierung bei den Einspeisungen könnte Leitungsverluste reduzieren.

4.3 REGIONALVERKEHR BERN – SOLOTHURN RBS

4.3.1 Erfassung des Energieverbrauchs

In den Fahrzeugen «Next» und «Worbla» wird der Energieverbrauch in der Fahrzeug-Leittechnik erfasst. Der Verbrauch wird aufgeschlüsselt nach Traktion / Rekuperation / Bremswiderstand / Steuerstrom / Hilfsbetriebe. Bei letzterem Punkt erfolgt jedoch keine weitere Aufschlüsselung nach den Verbrauchern wie z.B. Kompressor, Heizung, Lüftung, Klima etc.

Bei der aktuell ältesten Fahrzeuggeneration, den «Secondas» gibt es diese Erfassung nicht, es ist auch nicht vorgesehen diese nachzurüsten.

4.3.2 Anzeigen, Auslesen und Auswertung der Messdaten

Die Energie-Daten werden bisher nur bei den *Worbla*-Zügen ausgelesen, zusammen mit den Diagnosedaten. Es ist geplant, dass diese Daten in Zukunft permanent übertragen werden. Ob/wie die Energiedaten dann genutzt werden ist momentan noch offen.

4.3.3 Datenformate und -qualität

Eine messtechnische Bestimmung der Genauigkeit wird nicht als wichtig gesehen; wichtig sind die relativen Vergleiche.

Im Rahmen der Typenprüfung des neuen Fahrzeugtyps *Worbla* wird die Genauigkeit der Energiedatenerfassung gemessen. Mehr dazu in 0

Eine Standardisierung der Formate der Energiedaten könnte aus Sicht RBS über den VöV (oder in zweiter Instanz über RailPlus) angestrebt werden.

4.3.4 Aufwand und Kosten

Keine Angaben.

4.3.5 Umgesetzte oder in Erwägung gezogene Energiesparmassnahmen

Schlumberbetrieb hat zur Zeit wenig Relevanz, weil beim RBS die Fahrzeuge grundsätzliche ausgeschaltet und mit gesenktem Panto abgestellt werden.

Der RBS plant einen stationären Energiespeicher in Lohn-Lüterkafen. Wenn dieser mal in Betrieb sein wird, könnte die Energiedaten-Erfassung auf den Fahrzeugen genutzt werden,

um die unterschiedliche Nutzung der Bremswiderstände nachzuweisen. Vorab wird aber das Rückspeiseverhalten aller Fahrzeugtypen aufeinander abgestimmt, damit der Energiespeicher effizient genutzt werden kann. Dies wird auch die Rekuperation grundsätzlich unter den verschiedenen Fahrzeugtypen verbessern.

4.4 TRANSPORTS DE MARTIGNY ET RÉGIONS TMR

4.4.1 Erfassung des Energieverbrauchs

Die TMR betreiben einerseits die normalspurige Strecke von Martigny nach Orsières mit der Zweigstrecke von Sembrancher nach Le Châble. Diese Strecken gehören zum interoperablen Netz und werden hier nicht weiter betrachtet. Zum anderen betreiben die TMR die meterspurige und mit Gleichstrom elektrifizierte Strecke Martigny – Le Châtelard (MC). Dabei handelt es sich um eine ausgesprochene Gebirgsstrecke, inklusive einem Zahnstangenabschnitt. Die Verkehrsdichte auf der MC ist vergleichsweise gering (Stundentakt) und die Fahrzeugflotte dementsprechend klein.

Heute erfolgt auf den Fahrzeugen der TMR/MC keine Energiedatenerfassung. Die TMR haben sich aber offen erklärt, die vorliegende Studie bei Bedarf zu unterstützen, beispielsweise für Tests. Dies könnte aus zwei Gründen interessant sein:

- Die TMR planen gemeinsam mit der SNCF, welche die anschliessende Strecke über Chamonix nach St. Gervais betreibt, die Anschaffung einer neuen, durchgehend einsetzbaren Fahrzeugflotte. Zwar gehört auch die Meterspurstrecke der SNCF nicht zum interoperablen Netz, es ist aber nicht bekannt welche Strategie die SNCF in Bezug auf die Energiedatenerfassung auf diesen Fahrzeugen verfolgen wird.
- Aus fahrplantechnischen Gründen kann heute nur wenig Energie rekuperiert werden. Wegen dem grossen durchfahrenen Höhenunterschied (potentielle Energie) besteht hier ein beträchtliches Energiespar-Potential. Um es zu nutzen planen die TMR den Bau eines neuen, rückspeisefähigen Unterwerks. Nach dessen Inbetriebnahme wird es zweifellos ein Anliegen sein, die Einsparung zu erfassen. Dies wird primär über die infrastrukturseitigen Zähler erfolgen, punktuelle Messungen auf Zügen dürften aber zweifellos sinnvoll sein, insbesondere die Erfassung der in den Bremswiderständen umgesetzten (verlorenen) Energie mit/ohne Rückspeisung im neuen Unterwerk Vernayaz.

4.4.2 Anzeigen, Auslesen und Auswertung der Messdaten

n.a.

4.4.3 Datenformate und -qualität

n.a.

4.4.4 Aufwand und Kosten

n.a.

4.4.5 Umgesetzte oder in Erwägung gezogene Energiesparmassnahmen

Rückspeisefähiges DC-Unterwerk in Vernayaz in Planung.

4.5 MATTERHORN GOTTHARD BAHN MGB

4.5.1 Erfassung des Energieverbrauchs

Die MGB war ursprünglich nicht als Referenz-Netz für diese Studie vorgesehen, es wurde aber dennoch ein Gespräch mit einem Verantwortlichen aus dem Bereich Rollmaterial geführt.

Die MGB wird in Brig, Massboden, Ulrichen, Andermatt und Göschenen über 15/11-kV-Kuppeltransformatoren aus dem Netz der SBB gespeist. Zukünftig wird es im Bereich Disentis auch eine Kuppelstelle zur RhB geben. An diesen Stellen erfolgt auch die Energiezählung.

Auf den bisherigen Triebfahrzeugen der MGB gibt es keine Energiedatenerfassung; auf den bestellten neuen Triebzügen wird dies möglich sein.

Bei der MGB gibt es folgenden interessanten Aspekt: Auf ihrem Netz gibt es Regionalverkehr, Güterverkehr, den Autoverlad durch den Furkatunnel und den rein touristischen Verkehr (Glacier-Express). Diese Verkehrsarten sind unterschiedlich abgeltungsberechtigt, es bestand daher das Bedürfnis, den nur netzweit erfassten Energieverbrauch den einzelnen Verkehrsarten zuscheiden zu können. Zu diesem Zweck hatte die MGB vor einigen Jahren zwei "mobile" Energiemesssysteme beschafft, mit diesen während einiger Zeit auf verschiedenen Triebfahrzeugen Energiedaten gesammelt und diese dann für jede der genannten Verkehrsarten hochgerechnet. Die beiden Messsysteme sind immer noch auf Fahrzeugen vorhanden, es findet aber zu Zeit keine Auswertung von Daten statt.

4.5.2 Anzeigen, Auslesen und Auswertung der Messdaten

n.a.

4.5.3 Datenformate und -qualität

n.a.

4.5.4 Aufwand und Kosten

n.a.

4.5.5 Umgesetzte oder in Erwägung gezogene Energiesparmassnahmen

n.a.

4.6 ÜSTRA HANNOVERSCHE VERKEHRSBETRIEBE AG

4.6.1 Erfassung des Energieverbrauchs

Bei der ÜSTRA sind alle Fahrzeuge mit einem System zur Energiedatenerfassung ausgerüstet, bei 183 Fahrzeugen wird nur die Traktionsenergie (Aufnahme und Rückspeisung) erfasst, bei 153 Fahrzeugen zusätzlich auch die Nebenbetriebe. Zur Energiedatenerfassung werden ausschliesslich die auf den Fahrzeugen ohnehin vorhandene Leittechnik und Wandler verwendet.

4.6.2 Anzeigen, Auslesen und Auswertung der Messdaten

Die Datenübertragung erfolgt bei den 153 neueren Fahrzeugen über WLAN, bei den anderen 183 über einen angeschlossenen Laptop. Für das Fahrpersonal wird der Verbrauch am Display dargestellt.

Aus diesen Daten wird jeweils eine Jahresbilanz erstellt, aufgeschlüsselt nach Verbrauch an den Übergabestellen vom Energieversorger, Energieaufnahme Traktion, Energierückgabe Traktion und Nebenverbraucher.

4.6.3 Datenformate und -qualität

Die ÜSTRA ist vermutlich einer der ersten Betriebe, welche die Energiedaten so systematisch ausgewertet haben. Dementsprechend haben sie auch die Tools (Basis: Excel) und Datenformate für ihre Bedürfnisse entwickelt und sehen keinen Bedarf für eine Standardisierung.

4.6.4 Aufwand und Kosten

Keine Angaben

4.6.5 Umgesetzte oder in Erwägung gezogene Energiesparmassnahmen

Der Energieverbrauch pro gefahrenen Kilometer ist bei den ÜSTRA in den vergangenen 25 Jahren fast kontinuierlich stark gesunken. Nach Auskunft von ÜSTRA haben vor allem die folgenden Massnahmen dazu beigetragen:

- Heizungssteuerung beim Abstellen im Depot
- Konsequente Vermaschung des Fahrleitungsnetzes (zur optimalen Nutzung der rekuperierten Bremsenergie)
- Erhöhung der Rückspeisespannung auf 820 V (bei 600 V Nennspannung; die Rückspeisespannung liegt somit über dem Wert $U_{\max 2}$ von 800 V gemäss Norm EN 50163)

- Vorrangsteuerung bei Ampeln
- Drei rotierende Energiespeicher.

Demgegenüber wird von ÜSTRA bezweifelt, ob die Anzeige des Energieverbrauchs für das Fahrpersonal einen grossen Nutzen hat.

4.7 MOBIEL BIELEFELD

4.7.1 Erfassung des Energieverbrauchs

Bei allen Fahrzeugen des Typs *Vamos Bielefeld* (Bj 2011/2012) ist ein System zur Energiedatenerfassung vorhanden. Hier liefern verschiedene Baugruppen Verbrauchswerte an die Steuerung des Fahrzeuges, das diese dann zur Anzeige auf den Touchscreen beim Fahrer bringt. Dieser kann die Werte über einen Taster auf Null setzen, angezeigt werden nur die aufgenommene/rückgespeiste Energie, die der Fahrer direkt durch seine Fahrweise beeinflussen kann. Nebenverbraucher wie Heizung Kühlen werden nicht berücksichtigt.

Auf 2 Fahrzeugen vom Typ *M8D* (Alter ca. 25 Jahre) und 1 Fahrzeug Typ *Vamos* wurde ein von der Leittechnik unabhängiges Messsystem nachgerüstet: Zählwerk LEM EM4T über Strom- und Spannungswandler (am Stromabnehmer) werden die aufgenommenen/ abgegebenen Ströme gemessen, auslesen der Daten über Laptop im Fahrzeug, oder die Zählwerke im Zähler.

Die Daten aus den drei mit Zusatzsystemen ausgerüsteten Fahrzeugen wurden zur Beurteilung der folgenden Massnahmen verwendet:

- wie hoch ist der Rückspeise-Grad der Fahrzeuge auf den verschiedenen Linien
- Temperatur Optimierung im Fahrgastinnenraum
- Vermaschung des Fahrleitungsnetzes und Optimierung messen
- Welchen Einfluss haben die vier neuen Energiespeicher/Wechselrichter im Fahrleitungsnetz auf den Rückspeise Wirkungsgrad

4.7.2 Anzeigen, Auslesen und Auswertung der Messdaten

Bei den neuen *Vamos* werden die Energiedaten 1-2 täglich über ein eigenes WLAN Netz im Betriebshof übertragen.

Da zurzeit und in den letzten Jahren wenig passiert ist, wurde auch nicht mehr bewusst ausgewertet!

4.7.3 Datenformate und -qualität

Keine Angaben

4.7.4 Aufwand und Kosten

Zu den Kosten macht moBiel folgende Angaben:

Software für *Vamos* (SDH/KFM) war mit der Fahrzeugbeschaffung dabei, WLAN Netz Betriebshof schon etwas teurer wegen Verkabelung und Hardware (ca. 30'000 Euro). Hier lag aber der Schwerpunkt bei der Stördatenerfassung, die Energiedaten Werte sind eher ein Abfallprodukt! Keine Folgekosten (z.B. Eichung der Messsysteme => wird nicht gemacht; Providerkosten => keine GSM Karten nötig; Kabelstrecken => eigene).

4.7.5 Umgesetzte oder in Erwägung gezogene Energiesparmassnahmen

Zu den bereits umgesetzten Massnahmen ist vor allem die Abstellung der Fahrzeuge zu erwähnen: Fahrzeuge werden manuell (Fahrer), oder als Rückfallebene automatisch durch die Fahrzeug-SW auf dem Betriebshof abgerüstet. Im Winter bzw. kalte Jahreszeit sind die Fahrzeuge im Vorheizbetrieb (*M8D* und die noch älteren *M8C*), die neueren *Vamos* sind ausgeschaltet und werden von der Leitstelle ferneingeschaltet (1 h vor Ausfahrt) in den Vorheizbetrieb.

Fahrzeug-seitig sind bei moBiel diverse Ideen für weitere Optimierungen vorhanden; moBiel sieht hier aber in erster Linie die Fahrzeug-Hersteller in der Pflicht. Einige Beispiele: elektronische Schütze um in den Bremsphasen zu Heizen, Heizregister die Wärme speichern und dann über einen längeren Zeitraum abgeben. Beleuchtung (LED); Wärmepumpen, Abwärme der Antriebe, Fahrgastabhängige Frischluftzufuhr (über CO₂ Messung).

Infrastrukturseitig wurden (nebst der bereits erwähnten besseren Vermaschung im Fahrleitungsnetz) ein rotierender Energiespeicher und drei rückspeisefähige Unterwerke installiert, wobei moBiel zur Umsetzung derartiger Investitionen mehr Förderung wünscht, und auch Verbesserungspotential beim rechtlichen Rahmen sieht. Auch bei den Unterwerken sieht moBiel noch viel Potential, die neueren Fahrzeuge sind teilweise beim Bremsen gedrosselt, weil die Unterwerke die hohen Ströme dann als Störung erkennen könnten. Da wird viel Energie verschenkt (verheizt, => Bremswiderstand)! Die Unterwerke sind teilweise zu alt (Lebensdauer 40 Jahre) bis diese durch Neue ersetzt werden. Hier wäre Förderung nötig, um zügig auf neue Technik zu setzen, die auch die hohen Rückspeiseströme verarbeiten kann.

4.8 VERKEHRSBETRIEBE KARLSRUHE VBK

4.8.1 Erfassung des Energieverbrauchs

Bei den VBK besteht eine Mischform zwischen nicht interoperabel im mit Gleichstrom betriebenen Stadtbahnteil, und interoperabel, weil die Stadtbahnen der VBK auch auf das mit AC elektrifizierte Netz der DB übergehen (Karlsruher Modell, heute oft als Tram-Train bezeichnet). Dementsprechend sind die Fahrzeuge für den Betrieb unter AC 15 kV 16.7 Hz mit Zählern für die Energieverrechnung gegenüber der DB ausgerüstet.

Im Stadtbahnbereich (DC) erfolgt jedoch keine Energiezählung auf den Fahrzeugen.

Die VBK entwickeln in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ein Strassenbahn-Fahrzeug welches mit Mess-Sensoren ausgerüstet ist („Mess-Straßenbahn“). Die Absicht besteht darin, mit diesem nur einen Fahrzeug sehr gezielte und exakte Messungen durchführen zu können. Erfahrungen dazu liegen noch nicht vor.

4.8.2 Anzeigen, Auslesen und Auswertung der Messdaten

Keine Angaben

4.8.3 Datenformate und -qualität

Keine Angaben

4.8.4 Aufwand und Kosten

Keine Angaben

4.8.5 Umgesetzte oder in Erwägung gezogene Energiesparmassnahmen

Keine Angaben

5 Kosten von fahrzeugseitigen Energiezählern

5.1 ENERGIEZÄHLER

In [1] werden nebst vielen anderen Informationen und Überlegungen auch die Kosten für den Einbau der Energiezähler auf einer Flotte von 1183 Fahrzeugen der SBB beziffert. Der ursprünglich vorgesehene Kostenrahmen von 20 MCHF wird voraussichtlich um ca. 50% überschritten. Daraus lassen sich die durchschnittlichen Kosten pro Fahrzeug auf 25'000 CHF beziffern. Massgebend sind dabei weniger die Kosten für die Geräte, sondern vor allem die Engineering- und Einbaukosten.

Es ist davon auszugehen, dass zumindest ein Teil der benötigten Geräte die Lebensdauer der Fahrzeuge nicht erreichen und deshalb im Lauf des Lebenszyklus weitere Kosten entstehen.

Weil die Fahrzeugflotten der SBB in der Regel grösser sind als diejenigen der nicht interoperablen Bahnen muss zudem angenommen werden, dass die durchschnittlichen Kosten pro Fahrzeug beim Einsatz von Energiezählern bei den nicht interoperablen Bahnen noch höher ausfallen würden (siehe oben, relativ hoher Anteil der Engineering-Kosten). Andererseits kann davon ausgegangen werden, dass die Anforderungen der SBB eher am oberen Ende des Spektrums sind, und man sich ein Zählersystem für nicht interoperable Bahnen diesbezüglich etwas kostengünstiger vorstellen kann.

5.2 ENERGIEMESSUNG IN DER NORMALEN LEITTECHNIK

Zu den Kosten von in die normale Fahrzeug-Leittechnik integrierten Energiemesssystemen lässt sich feststellen: Bei der Neubeschaffung von Fahrzeugen entstehen bei rechtzeitiger Spezifikation keine Zusatzkosten. Bei der Nachrüstung bestehender Fahrzeuge sind die Kosten sehr stark vom technologischen Stand der betreffenden Fahrzeuge abhängig: Gibt es eine Leittechnik welche die notwendige Rechenleistung aufweist, und sind die notwendigen Strom- und Spannungswandler vorahnden? Einige Angaben dazu finden sich in den geführten Gesprächen im Kapitel 0.

5.3 WIRTSCHAFTLICHKEIT

Es ist nicht möglich, eine vollständige Wirtschaftlichkeitsrechnung für ein Energiemesssystem zu machen, weil ja das Energiemesssystem allein keine Energie spart. Eine Wirtschaftlichkeitsrechnung kann also eigentlich nur für eine Energie-Sparmassnahme gemacht werden, zu deren Wirksamkeitsnachweis allerdings ein Energiemesssystem sinnvoll bzw. notwendig sein kann. In den meisten Fällen genügen dazu allerdings punktuelle Messungen, siehe Tabelle 2 in Kapitel 0.

Eine Ausnahme bilden Fahr-Assistenzsysteme, die auf jedem Fahrzeug vorhanden sein müssen. Dazu können anhand von Zahlen der VBZ folgende Überlegungen gemacht werden:

Gemäss dem Geschäftsbericht 2019 der VBZ wurden für Traktion (Tram und Trolleybus) sowie Signalanlagen und Weichenheizungen 75.5 GWh aufgewendet. Nimmt man an, dass davon 60 GWh auf den Bereich Tram entfallen und dass dank optimierter Fahrweise (Ecodrive) 1% eingespart werden könnten (siehe 0) ergibt dies ein Sparpotential von 600 MWh pro Jahr. Bei angenommenen Kosten von 200 CHF/MWh ergibt dies ein Sparpotential von 120'000 CHF pro Jahr. Mit den in 0 geschätzten 25'000 CHF pro Fahrzeug würde das genannte Sparpotential jährlich die Ausrüstung von etwa fünf Fahrzeugen erlauben. Bei einem Flottenbestand von ca. 250 Fahrzeugen und einer durchschnittlichen Lebensdauer von 25 bis 30 Jahren lassen sich diese Investitionen nicht amortisieren. Hier muss aber nochmals betont werden: Die Wirtschaftlichkeit muss nicht für das Energiemesssystem allein gegeben sein, sondern für die Energiesparmassnahme(n). Und bei der Neubeschaffung von Fahrzeugen kann ein dazu geeignetes Energiemesssystem praktisch ohne Zusatzkosten integriert werden.

6 Zwischenfazit

Es kann als Stand der Technik betrachtet werden, dass die Leittechnik bei neueren Fahrzeugen aus den ohnehin vorhandenen Spannungs- und Stromwerten die Energiedaten ermittelt. Alle betrachteten Lösungen schlüsseln den Energieverbrauch auf nach:

- Aus dem Netz aufgenommene Energie
- Ins Netz rückgespeiste Energie
- Im Bremswiderstand (falls vorhanden) umgesetzte Energie
- Energie für Hilfsbetriebe und Komfortanlagen

Eine an sich wünschenswerte weitere Aufschlüsselung der Energie für Hilfsbetriebe und Komfortanlagen ist in der Regel nicht möglich, weil dazu keine Messwandler vorhanden sind. Eine serienmässige Ausrüstung mit solchen Wandlern wäre zu aufwendig und birgt die Gefahr, dass zusätzliche Störungsquellen in die Fahrzeuge eingebaut werden.

Die befragten Unternehmen sind übereinstimmend der Meinung, dass es zur Unterstützung und Überprüfung von Energieeffizienz-Massnahmen keine zusätzlichen Zählersysteme mit eigenen Messwandlern braucht. Die für diese Zwecke notwendigen Daten können problemlos aus den auf modernen Fahrzeugen ohnehin vorhandenen Wandlern, in der ohnehin vorhandenen Leittechnik generiert werden.

Bei Bestandsflotten, welche nicht über eine Energiedaten-Erfassung in der Leittechnik verfügen, ist eine differenzierte Betrachtung sinnvoll. Es kann sich durchaus lohnen, auch bei solchen Flotten noch Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz umzusetzen. Zum Nachweis genügen in den meisten Fällen punktuelle Messungen (siehe Tabelle 2 in Kapitel 0). Eine Ausrüstung einer ganzen Flotte ist dann sinnvoll, wenn dem Fahrpersonal eine Rückmeldung zum Energieverbrauch gegeben werden soll. Ob sich dies lohnt, muss fallweise abgeklärt werden: Die von den VBZ genannten 1% Einsparung (siehe 0) dürften dies eher nicht rechtfertigen; in Fällen wo das Fahrpersonal z.B. über den systematischen Einsatz bzw. Nicht-Einsatz der Rekuperationsbremse entscheidet kann die Situation anders aussehen.

Aus den Interviews haben sich verschiedene Themen ergeben, die im Anschluss vertieft wurden:

- Welche Energiesparmassnahmen erfordern welche Mess- und Registrierungssysteme
- Genauigkeit von Messsystemen
- Datenstruktur

7 Welche Energiesparmassnahmen erfordern welche Mess- und Registrierungssysteme

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden einige denkbare, zum Teil bei verschiedenen Betrieben bereits umgesetzte Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in Tabelle 2 zusammengestellt. Für jede Massnahme wurde überlegt, welche Energie-Messungen sinnvoll erscheinen zur Überprüfung der Wirksamkeit.

Eine beispielhafte Abschätzung des Energiespar-Potentials für einen grossen Teil der vorgeschlagenen Massnahmen findet sich im Anhang 2.

| Nr. | Massnahme Effizienzsteigerung | Messung Fahrzeug | Messung Infra | Auswertung | Anwendbar bei |
|-----|---|--|--|---|---------------|
| 1 | Fahrweise (Ecodrive, Einsatz Rekuperationsbremse) | Ja, möglichst viele/alle | Nein | Dezentral, als Feedback für Fahrpersonal | 1, 2, 4 |
| 2 | Abstellung der Züge, Schlumberbetrieb | Ja, einzelne (Typentest) | Eventuell, pro Abstellanlage | Dezentral, fallweise als Typentest | alle |
| 3 | Optimierung Gefässgrösse | Nein, (allenfalls einzelne Typentest) | Nein | Punktuell, vor allem zur Überprüfung von Simulationen | 1 |
| 4 | Technische Optimierungen Fahrzeug | Ja, einzelne (Typentest) | Nein | Einmalig, nach erfolgter Optimierung | alle |
| 5 | Anpassungen Heiztemperatur, Kühltemperatur | Auf ausgewählten Fahrzeugen | Nein | Über einen definierten Zeitraum | alle |
| 6 | Rückspeisefähige Unterwerke bei DC-Bahnen | Ev. punktuelle Messung Energieverlust in Bremswiderständen | Ja, beim dem/den rückspeisefähigen UW | Punktuell | 1, 2, 3 |
| 7 | Energiespeicher auf den Fahrzeugen | Auf ausgewählten Fahrzeugen | Nein | Punktuell | (1). |
| 8 | Energiespeicher fest installiert | Ev. punktuelle Messung Energieverlust in Bremswiderständen | Ja, beim dem/den Energiespeichern | Punktuell | 1, 2, 3 |
| 9 | Geregelte Spannung bei Unterwerken DC-Bahnen | Ev. punktuelle Messung Energieverlust in Bremswiderständen | Ja, bei geregelten u. konventionellen UW | Punktuell, Versuch | 1, 2, 3 |
| 10 | Bessere Vermaschung Fahrleitungsnetz | Nur auf Einzelfahrzeug(en) | Über die vorhandene Verrechnungszählung | Auf Fz: Punktell, Versuch Infra: über längeren Vergleichs-Zeitraum | 1 |
| 11 | Erhöhung der Rekuperations-Spannung | Nur auf Einzelfahrzeug(en) | Über die vorhandene Verrechnungszählung | Auf Fz: Punktell, Versuch Infra: über längeren Vergleichs-Zeitraum | 1, 2, 3 |
| 12 | Vorrangsteuerung bei Ampeln | Nur auf Einzelfahrzeug(en) | Über die vorhandene Verrechnungszählung | Auf Fz: Punktell, Versuch Infra: über längeren Vergleichs-Zeitraum | 1 |
| 13 | Fahr-Assistenzsysteme | Auf ausgewählten Fahrzeugen | Ja, ggf. Streckenweise Erfassung | Fahrzeuge: punktuell Infra: über längeren Vergleichs-Zeitraum | alle |

Tabelle 2 Übersicht möglicher Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und Vorschlag für Massnahmen zu deren Überprüfung. Die Nummern in der letzten Spalte beziehen sich auf die Kategorien gemäss Tabelle 1.

Diese Überlegungen wurden durch die Verfasser der Studien vorgenommen und anlässlich von zwei Sitzungen der Projekt-Begleitgruppe besprochen.

8 Genauigkeit von Messsystemen

8.1 AUSGANGSLAGE

Für Energiezähler werden die Anforderungen an die Genauigkeit der Teilsysteme in der Norm EN 50463-2 [2] spezifiziert. Demgegenüber gib es für die Energiedatenerfassung in der Leittechnik keine Vorgaben bezüglich der Genauigkeit. Wohl sind in vielen Fällen die relativen Vergleiche (z.B. unterschiedlicher Fahrweisen, oder des Energieverbrauchs vor und nach dem Umsetzen einer technischen Massnahme) wichtiger als die absoluten Werte. Dennoch ist es grundsätzlich nicht befriedigend, Messungen vorzunehmen ohne zu wissen, wie genau sie sind. Aus diesem Grund wurde das auch in mit einigen Nutzern solcher Systeme angesprochen (0) und mit eigenen Überlegungen (0) ergänzt.

8.2 RÜCKMELDUNGEN VON BETREIBERN

Im Rahmen der durchgeführten Gespräche mit Betreibern haben wir zur Genauigkeit der vorhandenen Energiemess-Systeme folgende Informationen erhalten:

8.2.1 VBZ

Die Energieverbrauchs-Messungen im Rahmen der Typentests der neuen Flexity-Fahrzeuge stehen noch aus. VBZ nimmt den Input auf, bei dieser Gelegenheit die Genauigkeit des Energie-Datenerfassungssystem zu prüfen.

8.2.2 RBS

Beim RBS wurden mit den neuen Worbla-Fahrzeugen Referenzmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden uns vom RBS zur Verfügung gestellt und sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

| Messung | | Unabhängige Messung | Leittechnik | Abweichung Leittechnik |
|---------------------------|-----------------------|---------------------|-------------|------------------------|
| 2. Fahrt Bern – Worb Dorf | Bezogene Energie | 100.5 kWh | 101.4 kWh | +0.9% |
| | Rückgespeiste Energie | -10.4 kWh | -10.9 kWh | +4.8% |
| 3. Fahrt Worb Dorf – Bern | Bezogene Energie | 118.1 kWh | 118.8 kWh | +0.6% |
| | Rückgespeiste Energie | -17.4 kWh | -17.9 kWh | +2.9% |
| 4. Fahrt Bern – Worb Dorf | Bezogene Energie | 100.8 kWh | 103.2 kWh | +2.3% |
| | Rückgespeiste Energie | -16.8 kWh | -17.4 kWh | +3.6% |
| Stillstand Worb Dorf | 9min | 7.5 kWh | 8.1 kWh | +8.0% |
| Stillstand Bern | 9min | 7.5 kWh | 7.5 kWh | +0.0% |
| Schlumberbetrieb Depot | 2h | 19.0 kWh | 16.6 kWh | -12.6% |

Tabelle 3 Vergleich Energiemessung in der Leittechnik und Referenzmessung bei den neuen Fahrzeugen Worbla des RBS

Aus dem Vergleich der Zahlen wird ersichtlich, dass vor allem bei kleinen Leistungen (Stillstand, Schlumberbetrieb) die Abweichungen doch beträchtlich sind, ausserdem sind die Abweichungen bei der Rückspeisung durchwegs grösser als beim Energiebezug. Aus Sicht der Autoren empfiehlt es sich, den Gründen für die Abweichungen nachzugehen (siehe auch Überlegungen im nächsten Abschnitt).

8.3 EMPFEHLUNGEN ZUR MESSGENAUIGKEIT

Eine Energiemessung besteht im wesentlichen aus der Messung von Primärspannung und -strom, deren Multiplikation zur Bestimmung der Leistung, sowie Integration über der Zeit zur Bestimmung der Energie. Bei Wechselstromfahrzeugen muss zusätzlich noch die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung gemessen und berücksichtigt werden. Somit gibt es drei Faktoren, welche die Genauigkeit des Ergebnisses bestimmen:

1. die Genauigkeit der Strommessung
2. die Genauigkeit der Spannungsmessung
3. die Korrektheit der nachfolgenden Rechenoperationen.

Zu Punkt 1: Es wird empfohlen, Wandler der Genauigkeits-Klasse 1.0 R (gemäss EN50462-2 [2]) einzusetzen. Dies ist die niedrigste Genauigkeitsklasse gemäss der genannten Norm. Im Bereich zwischen 10 und 120% des Nennstromes dürfen diese Wandler einen Messfehler von 1% aufweisen².

Zu Punkt 2: Es wird empfohlen, Wandler der Genauigkeits-Klasse 1.0 R (gemäss EN50462-2 [2]) einzusetzen. Im Bereich zwischen $U_{\min 1}$ und $U_{\max 2}$ (gemäss EN 50163) dürfen diese Wandler einen Messfehler von 1% aufweisen².

Zu Punkt 3: Hier geht es nicht um Toleranzen im physikalisch/statistischen Sinn; jedoch muss die Korrektheit der Berechnung durch die Qualitätssicherung bei der Software-Entwicklung sichergestellt werden. Allenfalls kann die numerische Auflösung der Messwerte eine Rolle spielen. Im Rahmen dieser Arbeit wird vorgeschlagen, dass auch für die Energieberechnung die Genauigkeitsklasse 1.0 R (gemäss Tabelle 16 in EN50462-2 [2]) erreicht werden soll.

Der Zusammenhang zwischen den maximal zulässigen Fehlern ist in der EN50462-2 [2] wie folgt definiert:

$$\varepsilon_{EMF} = \sqrt{(\varepsilon_{VMF})^2 + (\varepsilon_{CMF})^2 + (\varepsilon_{ECF})^2}$$

mit (alle Werte in Fehler-Prozenten)

ε_{EMF} Zulässiger Fehler des gesamten Energiemess-Systems

ε_{VMF} Maximal zulässiger Messfehler der Spannungsmessung

ε_{CMF} Maximal zulässiger Messfehler der Strommessung

ε_{ECF} Maximal zulässiger Fehler in der Energieberechnung

Bei AC-Anwendungen besteht eine zusätzliche Schwierigkeit darin, dass man zu den Wandlern kaum Angaben zur Phasengenauigkeit findet. Einige Messungen und Überlegungen dazu finden sich in [3].

² Weitere Angaben, z.B. zur Genauigkeit ausserhalb des angegebenen Bereichs sowie zur zulässigen Änderung der Genauigkeit in Funktion der Temperatur siehe [2]

Eine erste Einschätzung ergibt, dass diese Vorgaben mit den in Tabelle 3 ausgewiesenen Genauigkeiten noch nicht in jedem Bereich erreicht werden. Es wird empfohlen, die Gründe abzuklären. Falls es keine zwingenden technischen Gründe gibt für ein Abweichen von den oben gemachten Vorschlägen wird empfohlen, diese Vorgaben zukünftig für neu zu beschaffende Fahrzeuge verbindlich zu machen, z.B. durch eine entsprechende RTE.

9 Vorschlag einer gemeinsamen Datenstruktur

Die Energiedaten werden bei den betrachteten Bahnen individuell, das heisst fahrzeugspezifisch über ein Diagnostic Data Set als Datei, beispielsweise pro Fahrt gespeichert. Entsprechend ist auch die Auswertung oder Weiterverarbeitung der Daten mit verschiedenen Tools spezifisch. Eine Standardisierung der Daten in Bezug auf die Energiedaten würde von den befragten Bahnen mehrheitlich begrüsst.

Damit kann erreicht werden:

- Einheitliche Anforderung an die Lieferanten bezüglich Energiedaten bei der Ausschreibung von Fahrzeug (Lastenheft)
- Beim Betreiber ein Auswertetool für alle Fahrzeuge nutzbar
- Vollständige Dokumentation der aufgezeichneten Daten (Messwerte, Einheiten, Primärwerte, Sekundärwerte, Übersetzungen, Anzahl Messwerte/Zeiteinheit, Mittelwertbildung/Zeiteinheit)
- Zeitlicher Bezug der Messwerte absolut oder relativ
- Örtlicher Bezug (GPS) oder Bezug auf Fahrt
- Datei pro Fahrt, pro 15 Minuten, ...
- Aufzeichnung Start – Stop Kriterien (manuell oder automatisch)

Für eine solche Standardisierung der Datenformate bietet sich ein Vorgehen nach dem Regelwerk der Technik RTE des VöV an. Die Standardisierung betrifft nur die Datenformate, nicht die Datenübertragung vom Fahrzeug.

Als Beispiel für solche Standards aus der allgemeinen Energietechnik gelten das COMTRADE Format (EN60255-24) oder das Power Quality Data Interchange Format PQDIF (IEEE 1159.3).

10 Empfehlungen

10.1 ÜBERSICHT

Die zur Umsetzung bzw. vertieften Prüfung **empfohlenen** Massnahmen werden hier stichwortartig aufgelistet. Die Begründung folgt pro Massnahme in den folgenden Unterkapiteln.

1. **Neufahrzeuge:** Festlegung einer **Energiemessfunktion im Lastenheft**.
2. **Bestandsfahrzeuge mit Leittechnik:** Nutzung einer bestehenden oder ggf. Nachrüstung einer **Energiemess-Funktion mit vorhandenen Messwandlern und vorhandener Leittechnik**.
3. **Bestandsfahrzeuge ohne Leittechnik:** keine systematische Nachrüstung mit Energiemesssystemen, **Realisierung kostengünstiger Lösungen im Einzelfall**.
4. **Keine systematische Ausrüstung** von Fahrzeugen nicht interoperabler Bahnen mit **Energiezählern**.
5. **Standardisierung der Datenstruktur**.
6. **Festlegung der Anforderungen an die Genauigkeit** der Energiemess-Systeme.

10.2 REALISIERUNG EINER ENERGIEMESS-FUNKTION MIT VORHANDENEN MESSWANDLERN UND LEITTECHNIK BEI NEUFahrZEUGEN

Die auf modernen Fahrzeugen ohnehin vorhandene Hardware kann ohne weiteres genutzt werden, um Daten zum Energieverbrauch zu erfassen, zu übertragen und dem Fahrpersonal in geeigneter Form anzuzeigen. Solche Softwarefunktionen zur Bereitstellung der Energiedaten innerhalb der vorhandenen Leittechnik und mit den ohnehin vorhandenen Messwandlern sollten bei neu zu beschaffenden Fahrzeugen, oder bei Fahrzeugen wo die Software einfach ergänzt werden kann, immer vorgesehen werden.

10.3 NACHRÜSTUNG BESTEHENDER FLOTTEN NACH BEDARF

Fahrzeuge mit rechnerbasierter Leittechnik

Bei solchen Fahrzeugen ist die Nachrüstung mit einer Energiemess-Funktion insbesondere im Rahmen von Retrofit oder Software-Upgrades denkbar. Eine generelle Empfehlung dazu kann hier nicht abgegeben werden. Der Aufwand muss fallweise ermittelt und am erwarteten Nutzen gemessen werden.

Fahrzeuge ohne rechnerbasierte Leittechnik

Eine systematische Nachrüstung von älteren Fahrzeugen, wo eine Energieauswertung nicht ohne weiteres im Rahmen einer ohnehin vorhandenen (bzw. bei noch älteren Fahrzeugen nicht vorhandenen) Leittechnik möglich ist, wird nicht empfohlen. Je nach geplanter Restlebensdauer dieser Fahrzeuge kann zwar die Umsetzung von Energiesparmassnahmen durchaus noch Sinn machen. Zur Überprüfung bzw. zum Nachweis derartiger Massnahmen genügen aber punktuelle Messungen mit mobilen Messsystemen, wie sie zum Beispiel von der MGB eingesetzt wurden (siehe 0).

10.4 KEINE AUSRÜSTUNG DER FAHRZEUGE NICHT INTEROPERABLER BAHNEN MIT ENERGIEZÄHLERN

Die Autoren dieser Studie sind zum Schluss gelangt, dass eine Ausrüstung der Fahrzeuge nicht interoperabler Bahnen mit Energiezählern wie bei den interoperablen Bahnen, nicht empfohlen werden kann. Weil bei nicht interoperablen Bahnen die Abrechnung nicht über die Energiemessung auf den Fahrzeugen erfolgt, wäre der Aufwand unverhältnismässig. Für die beiden Hauptzwecke:

- Anzeige des Energieverbrauchs an das Fahrpersonal
- Datengrundlage für punktuelle Messungen zur Beurteilung von geplanten und durchgeführten Verbesserungsmassnahmen

können die auf modernen Fahrzeugen ohnehin vorhandenen Messwandler und Leittechniksysteme genutzt werden.

Die Ausrüstung der Fahrzeuge mit zusätzlichen Systemen und Komponenten ist nicht nur kostspielig; zusätzliche Komponenten sind immer auch zusätzliche Störungsquellen. Auch wenn die Kosten einer Ausrüstung mit Zählern bei den nicht interoperablen Bahnen nur sehr grob abgeschätzt werden konnten (siehe Kapitel 0), stehen sie in keinem Verhältnis zum Zusatznutzen im Vergleich zur Energiemessung und Auswertung im Rahmen der vorhandenen Leittechnik.

10.5 STANDARDISIERUNG DER DATENFORMATE

Als sinnvoll betrachtet wurde der Vorschlag, die Datenformate von Energieerfassungssystemen in der Leittechnik zu vereinheitlichen. Dies könnte im Rahmen des Regelwerks Technik (RTE) des VöV erfolgen.

10.6 FESTLEGUNG DER ANFORDERUNGEN AN DIE GENAUIGKEIT DER ENERGIEMESS-SYSTEME

Ein gewisses Augenmerk sollte der Genauigkeit der Energieauswertung in der Leittechnik gewidmet werden. Ein Vorschlag für eine für neu zu beschaffende Fahrzeuge anzuwendende Genauigkeits-Vorgabe findet sich in 0. Es wird empfohlen, dass dieser Vorschlag, bzw. die Machbarkeit und allfällige Kostenfolgen seiner Umsetzung, gemeinsam mit der Industrie erarbeitet werden. Die definitive Vorgabe sollte dann ebenfalls z.B. in den RTE festgeschrieben werden.

11 Abschliessende Überlegungen der Autoren

Die Frage der geeigneten Energiemessung, immer mit dem Ziel der Reduktion des Energieverbrauchs, kann nicht losgelöst von den eigentlichen Energiespar-Massnahmen erarbeitet werden. Die wichtigsten Überlegungen dazu wurden im Kapitel 0 erläutert. Abschliessend erlauben sich die Autoren, im Hinblick auf eine bessere Energieeffizienz noch ein paar bewusst provokative Fragen zu stellen:

- Könnte man die Nicht-Interoperabilität der Bahnen, um welche es hier geht, nicht auch dazu nutzen, die Sicherheit des Personals und der Passagiere auf andere Weise zu gewährleisten als durch die Übernahme immer weitergehender Crachsicherheits-Anforderungen, mit ihrem entsprechenden Mehrgewicht und zusätzlichen Energieverbrauch der Fahrzeuge? Wäre das Geld nicht besser investiert in die Kollisions-Verhinderung (Stichworte dazu: Zugsicherungssysteme, Trennung Schiene-Strasse, Bahnübergänge)? Gedacht wird hier nicht an die Strassenbahnen, aber an die anderen nicht interoperablen Bahnen.
- Sollte man insbesondere bei Strassenbahnen nicht wieder Wege suchen, wie die Gefässgrösse im Tagesverlauf der Nachfrage angepasst werden kann? Es ist den Autoren bewusst, dass das Stärken / Schwächen der Kompositionen (wie es früher oft üblich war, und es zum Teil bei ausländischen Betrieben auch heute noch ist) einen betrieblichen Mehraufwand darstellt. Aber ist es angesichts der heute zirkulierenden Erfolgsversprechen von ATO (Automatic Train Operation) wirklich so utopisch, sich ein System vorzustellen, welches "nur" die zum Stärken/Schwächen notwendigen Rangierfahrten automatisieren würde?
- Müssen auch Transportmittel, in welchen sich die Fahrgäste nur wenige Minuten aufhalten, immer klimatisiert sein? Selbst wenn man nicht gleich so weit gehen will die Klimatisierung ganz in Frage zu stellen: Es besteht ein Bedarf nach Sollwert-Vorgaben für die Innentemperatur in Abhängigkeit von der Aussentemperatur, welche dem Ziel eines tiefen Energieverbrauchs Rechnung tragen. Im Rahmen dieser Studie wurde das Anliegen nach diesbezüglichen verbindlichen Vorgaben durch das BAV nur von den VBZ formuliert. Die Autoren dieser Studie sind der Ansicht, dass dieses Anliegen nachvollziehbar ist, und dass dessen Umsetzung für die ganze Branche und für das Ziel hoher Energieeffizienz einen Mehrwert generieren würde.

Literaturverzeichnis

- [1] Energiemessung auf Bahnfahrzeugen in der Schweiz. Abschlussarbeit des CAS Eisenbahntechnologie - Elektrische Anlagen 2018 – 2019. Daniel Widmer. HEIA-FR | Pérolles 80 | CH-1700 Fribourg | <https://www.heia-CHF.ch/>
- [2] EN50463-2, Railway applications - Energy measurement on board trains - Part 2: Energy measuring
- [3] Verifikation der Zählerinstallation, Triebfahrzeug RBDe 560. Railectric Bericht 18-005, Version 01 vom 29.5.2018
- [4] Pilotversuch energiesparende Fahrweise, Schlussbericht EsöV-Projekt 047
- [5] Machbarkeitsstudie Energieeffizienz FLIRT, Schlussbericht EsöV-Projekt 059
- [6] Energiekonzept Appenzeller Bahnen. Beitrag zur Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr, Schlussbericht EsöV-Projekt 088
- [7] Simulation Energiebilanz Heizung Lüftung Klima: ICN (SBB), Schlussbericht EsöV-Projekt 056
- [8] Energiesparpotential im Bahnenergieversorgungsnetz der Basler-Verkehrsbetriebe. Elektrische Bahnen 2-3/2020
- [9] Récupération d'énergie dissipée au freinage sur voie étroite Martigny – Châtelard. Schlussbericht EsöV-Projekt 095

Anhang

ANHANG 1, STANDARD-FRAGEBOGEN AN DIE BETREIBER DER REFERENZ-NETZE

1. Welche Energiemesssysteme gibt es im betrachteten Betrieb bereits (sowohl Infrastruktur- wie auch Fahrzeugseitig)?
2. Genauere Angaben zu bereits eingesetzten Energiemesssystemen (Typ, wieviele Messwerte pro Zeit)
3. Welche Fahrzeuge sind/ werden ausgerüstet? Einzelne jedes Typs oder ganze Flotte?
4. Was sind die Erwartungen des Betreibers an den Einsatz des Energiemesssystems?
5. Welches sind die Installationen auf dem Fahrzeug
 - a. Neue Fahrzeuge
 - b. Bestehende Fahrzeuge
6. Was wird mit den Daten gemacht, Aufwand Kosten für Datenhandling, Kommunikation, für Auswertungen,
 - a. Auf dem Fahrzeug
 - b. Stationäres Datenauslesen (über bestimmte Zeitdauer, Streckenbezogen)
 - c. Datenfernübertragung zu zentraler Auswertung?
 - d. Manuelle Bedienungen durch Fahrzeugführer ?
 - e. Gezielte Datenaufzeichnung und Auswertung (Versuche, bestimmte Fahrten, Depotverhalten, Vergleiche)?
7. Auswertung durch wen?
8. Was sind die Kosten für die Installation bei neuen und bei bestehenden Fahrzeugen?
9. Was ist der erwartete Nutzen, Nutzen bereits realisiert (Berichte dazu)?
10. Gibt es ein (Standard)-Lastenheft für die Energiemessung an die Lieferanten (Anforderungen an Genauigkeit, Messwerte (Min), Datenformate, ... ?
11. Gibt es Realisierungspflichtenhefte, Beschreibungen?

ANHANG 2, ENERGIESPARPOTENTIALE AUSGEWÄHLTER MASSNAHMEN

Im Kapitel 0 wird für einige der oft diskutierten, denkbaren Massnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs aufgezeigt, welche Energiemess-Massnahmen zur Überprüfung und Unterstützung eingesetzt werden sollten. Obwohl die Abschätzung des Einsparpotentials dieser Massnahmen nicht Teil der vorliegenden Studie ist, werden in der folgenden Tabelle ein paar Anhaltspunkte gegeben. Die Zahlen stammen aus veröffentlichten Berichten (die Referenz ist jeweils angegeben). Es ist allerdings grösste Vorsicht geboten, diese Zahlen einfach vom untersuchten Fall auf einen anderen Fall zu übertragen. In der Regel ist eine Untersuchung unter den im Anwendungsfall gegebenen Bedingungen unerlässlich.

| | Thema | Einsparpotential | Referenz | Bemerkung |
|--------------|---|------------------|----------|---|
| 1, 13 | Fahrweise bzw. Fahr-Assistenzsysteme | | | |
| | Einschätzung VBZ | 1.0% | 5.1.2 | Die grosse Streuung scheint plausibel. Beim Tram ist die Fahrweise gossenteils durch den Strassenverkehr gegeben, weniger Optimierungsspielraum. |
| | BLS Pilotversuch energiesparende Fahrweise Versuchsfahrten mit drei Fahrassistenzsystemen | 8.8 - 16.2% | [4] | |
| 2 | Abstellung der Züge, Schlummerbetrieb | | | |
| | Grobe Abschätzung | 0 - 10% | [5] | 0%: Falls Züge normal mit ausgeschaltetem Hauptschalter abgestellt werden. 5%: Abschätzung: Studie [5] ergibt Sparpotential durch optimierte Abstellung Triebzüge Flirt mit 28 MWh/a pro Zug an. Folgende Daten sind geschätzt: Mittlere Bruttomasse 125 t, mittlere Laufleistung 150'000 km/a, mittlerer Energieverbrauch 30 Wh/Btkm. Damit ergibt sich ein Jahresverbrauch pro Triebzug von 563 MWh. Die Einsparung beträgt somit 5%. 10%: [5] gibt an, dass der Schlummerbetrieb vor den vorgeschlagenen Massnahmen bereits weitgehend optimal sei. Annahme, dass ausgehend vom nichtoptimalen Schlummerbetrieb das Sparpotential doppelt so gross ist. |
| 3 | Optimierung Gefässgrösse | | | |
| | Energiekonzept Appenzeller Bahnen. Beitrag zur Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr. | 3.7% | [6] | In der genannten Referenz wurde die Optimierung nur auf einer Linie des gesamten Netzes betrachtet. Es sind auch deutlich grössere Einsparungen denkbar; der betriebliche (Rangieren) und Infrastruktur-Aufwand (Abstellanlagen) sind allerdings gross. |
| 4 | Technische Optimierungen Fahrzeug | | | |
| | Bsp. Flirt | 10.0% | [5] | Gleiches Bsp. wie unter 2. Ohne den dort bereits behandelten Schlummerbetrieb weist [5] ein Sparpotential von 57 MWh/a pro Fahrzeug aus. Mit den gleichen, geschätzten Bezugsgrössen wie in 2. ergibt sich eine Einsparung von 10%. Je nach bereits erreichtem Stand der Optimierung kann das Potential aber auch stark abweichen. |
| 5 | Anpassungen Heiztemperatur, Kühltemperatur | | | |
| | Bsp. ICN | 3.0% | [7] | Bericht [7] weist für den ICN ein Sparpotential von 8.4% der gesamten HLK-Energie für eine Temperaturabsenkung von 1 Kelvin aus. Wenn man davon ausgeht dass HLK 1/3 des Energiebedarfs ausmacht (20 - 40% gemäss [7]) entspricht dies einer Reduktion von 3% auf den gesamten Energieverbrauch. |
| 6 | Rückspeisefähige Unterwerke bei DC-Bahnen | | | |
| | BVB (Tram) | 0.9% | [8] | Relativ geringe Einsparung, weil nur an einem UW-Standort eine rückspeisefähige Anlage angenommen wurde (allerdings am besten Standort im BVB-Netz). Die Einsparung könnte vergrössert werden wenn noch weitere Anlagen gebaut würden, die ohnehin schon schlechte Wirtschaftlichkeit würde dadurch aber noch schlechter ¹⁾ . Ausserdem können beim dichten Trambetrieb gemäss [8] bereits ohne Massnahmen ca. 75% der Bremsenergie genutzt werden (gilt für alle BVB-Beispiele). |
| | TMR (Gebirgsbahn, Zahnstangenrampe) | 25.8% | [9] | In diesem Fall ist das Einsparpotential gross, weil der Energieverbrauch vor allem in Form von potentieller Energie konzentriert an "einer Stelle" im Netz anfällt und dort auch wieder zurückgewonnen werden kann. Dennoch ist die Wirtschaftlichkeit gemäss [9] nur knapp gegeben ¹⁾ . |
| | | | | |
| | | | | |

¹⁾ Bei solchen Anlagen wird die Wirtschaftlichkeit zu einem grossen Teil bestimmt durch die Preisdifferenz zwischen bezogener und zurückgespeicherter kWh.

| Thema | Einsparpotential | Referenz | Bemerkung |
|---|------------------|----------|--|
| 7 Energiespeicher auf den Fahrzeugen | | | |
| | 7.6% | [8] | Im untersuchten Fall (Tram) hat die Massnahme ein grosses Sparpotential, ist aber trotzdem nicht wirtschaftlich wegen den hohen Investitionskosten (Ausrüstung aller Fahrzeuge). Im Fall von Bergbahnen ist die Massnahme kaum realistisch wegen dem grossen Zusatzgewicht genügend grosser Batterien auf den Fahrzeugen. |
| 8 Energiespeicher fest installiert | | | |
| BVB (Tram) | 0.7% | [8] | Gleiche Bemerkung wie unter 6.: Es wurde nur an einem UW-Standort ein Speicher vorgesehen. Durch eine grössere Anzahl Speicher liesse sich das Energieparpotential vergrössern, gleichzeitig würde die Wirtschaftlichkeit aber schlechter. |
| TMR (Gebirgsbahn, Zahnstangenrampe) | 17.8 - 22.3% | [9] | Gleiche Bemerkung wie unter 6. Die tiefere Zahl gilt für einen Speicher, welcher für diesen Anwendungsfall ein wirtschaftliches Optimum darstellt (90 kWh). Die grössere Zahl gilt für einen doppelt so grossen Speicher (180 kWh), welcher auch an Spitzenverkehrstagen das Rekuperationspotential voll ausschöpfen kann. Die Wirtschaftlichkeit ist aber bei letzterem Fall deutlich schlechter. |
| 9 Geregelte Spannung bei Unterwerken DC-Bahnen | | | |
| Keine Angaben | | | Das vermutete Einsparpotential beruht auf der Reduktion der Leitungsverluste und dürfte höchstens im tiefen einstelligen Prozentbereich liegen. |
| 10 Bessere Vermaschung Fahrleitungsnetz | | | |
| BVB (Tram) | 1.2 - 1.7% | [8] | Bei Netzen wo dies nicht bereits realisiert ist wird diese Massnahme empfohlen, weil sie sehr kostengünstig umgesetzt werden kann (allenfalls gewisse Anpassungen beim Fahrleitungsschutz notwendig). |
| 11 Erhöhung der Rekuperations-Spannung | | | |
| | 0.7% | [8] | Gegenüber [8] beurteilen wir die Machbarkeit dieses Vorschlages etwas kritischer. Wenn bis U_{max2} voll rekuperiert werden darf steigt das Risiko von kurzzeitigen Spannungswerten mit mehr als U_{max2} . Es muss sichergestellt werden, dass sämtliche Anlagen im Netz (sowohl Infrastruktur- wie Fahrzeug-seitig) diesen höheren Spannungen standhalten. |
| 12 Vorrangsteuerung bei Ampeln | | | |
| Keine Angaben | | | |