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)

Pilotversuch energiesparende Fahrweise

Versuchsfahrten mit drei Fahrassistenzsystemen

Schlussbericht

Thomas Studer, BLS AG
Genfergasse 11, 3001 Bern, thomas.studer@bls.ch, www.bls.ch

Begleitgruppe

Thomas Stupp, BLS AG, Bahnproduktion
Martin Leu, BLS AG, Bahnproduktion
Marcus Lindemann, BLS AG, Bahnproduktion
Peter Zwygart, BLS AG, Bahnproduktion
Roland Pfaffen, BLS Netz AG
Francis Waefler, BLS Netz AG
Andreas Kronawitter, BLS AG, Informatik
Hans-Bernhard Fiechter, BLS AG, Personenverkehr
Stefan Füglistaller, SBB AG, Infrastruktur
Thomas Graffagnino, SBB AG, Infrastruktur
Roland Schäfer, SBB AG, Infrastruktur

Impressum

Herausgeberin:
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)
CH-3003 Bern

Programmleiter
Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 047
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 20.12.2017

Inhalt

Executive Summary (Deutsch) ... 2
Résumé opérationnel ... 2
Executive Summary (English) ... 2
Zusammenfassung in Deutsch ... 3
Résumé en français ... 7
1. Ausgangslage ... 11
2. Ziel der Arbeit ... 11
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand ... 12
3.1. Forschungsansatz ... 12
3.2. Ausgestaltung des Pilotversuchs ... 12
4. Ergebnisse ... 17
4.1. Methodik zur Auswertung der Testfahrten ... 17
4.2. Vergleich der Fahrprofile mittels Simulation ... 17
4.3. Energieverbrauch: Ergebnisse aus den Testfahrten ... 18
4.4. Pünktlichkeit und Streuung ... 19
4.5. Akzeptanz beim Lokpersonal ... 20
5. Diskussion ... 22
5.1. Wirkungen von Fahrempfehlungen ... 22
5.2. Weitere wichtige Erkenntnisse ... 22
6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen ... 24
6.1. Schlussfolgerungen ... 24
6.2. Empfehlungen ... 24
6.3. Abstimmung mit weiteren Projekten ... 25
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis ... 26
Abbildungsverzeichnis ... 26
Tabellenverzeichnis ... 26
Literaturverzeichnis ... 26

Executive Summary (Deutsch)

Die BLS hat in einem Pilotprojekt gemeinsam mit SBB Infrastruktur drei Fahrempfehlungssysteme (englisch: Driver Advisory System - DAS) getestet. Die Testfahrten und Analysen zeigen, dass der Energieverbrauch im S-Bahn-Betrieb um bis zu 10-15% reduziert werden kann, wenn der betriebliche Fahrplan energieoptimiert wird und die Fahrempfehlungen für das Lokpersonal ergonomisch angezeigt werden. Die Fahrempfehlungen gewährleisten eine hohe Pünktlichkeit und tragen zu einer reduzierten Streuung der Fahrweise bei.

Résumé opérationnel

Dans le cadre d'un projet pilote, BLS a testé trois systèmes de recommandation de conduite (anglais: DAS ou Driver Advisory System) en collaboration avec CFF Infrastructure. Les trajets d'essai et les analyses montrent que la baisse de la consommation d'énergie dans l'exploitation des RER peut atteindre 10 à 15 % si l'horaire d'exploitation est optimisé sur le plan énergétique et si les recommandations de conduite sont affichées de manière ergonomique pour le personnel des locomotives. Les recommandations de conduite garantissent une ponctualité élevée et contribuent à réduire la dispersion dans la manière de conduire.

Executive Summary (English)

In a pilot project together with SBB Infrastructure, BLS has tested three driver advisory systems (DAS). The test runs and analyses indicate that energy consumption in S-Bahn operations can be reduced by up to 10 to 15% if the operational timetable is energy optimised and the driving advices displayed ergonomically for the locomotive personnel. The driving recommendations guarantee a high level of punctuality and contribute towards reduced variation in the quality of driving.

Zusammenfassung in Deutsch

Ausgangslage

Aktuell gibt es bei der BLS keine klare Vorgabe gibt, ab wann und in welchem Umfang Fahrzeitreserven für energiesparendes Fahren zu nützen sind. Dies führt dazu, dass jeder Lokführer[1] eine eigene Fahrstrategie entwickelt und die Fahrweisen zwischen den Lokführern und je nach Gegebenheit relativ weit streuen. Zudem fehlen den Lokführern wichtige Informationen, um – eingebettet ins Fahrplangefüge – möglichst energieeffizient fahren zu können.

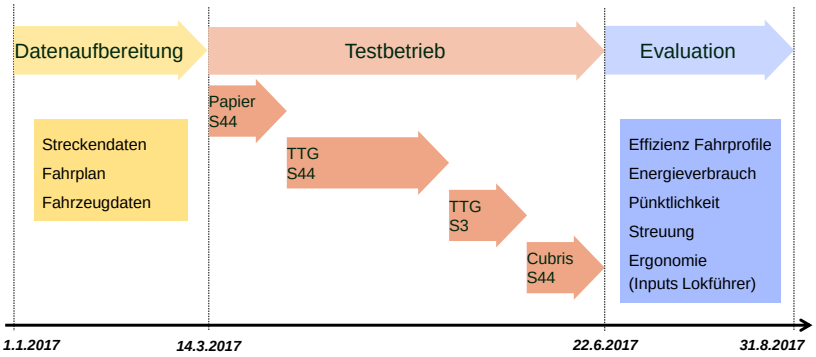
Das seit Ende 2015 auch bei der BLS eingesetzte System *adaptive Lenkung* (ADL)[2] dient dazu, unnötige Stopps vor Haltesignalen zu vermeiden. Bei Vorzeitigkeit empfiehlt ADL zudem reduzierte Geschwindigkeiten für energiesparendes Fahren (Funktion ADL Eco). ADL und vor allem ADL Eco kommen im S-Bahn-Verkehr aber nur selten zum Einsatz – vor diesem Hintergrund sind die im Rahmen des Pilotprojekts getesteten Fahrempfehlungen für den Regelbetrieb als wichtige und notwendige Ergänzung / Komplementierung zum System ADL zu betrachten.

Fragestellung

Das Pilotprojekt soll eine Antwort auf die Frage liefern, ob Fahrempfehlungen für das Lokpersonal ein geeignetes Instrument sind, um die Bahnstromkosten auf wirtschaftliche Art und Weise zu senken und gleichzeitig zu einer unverändert hohen oder gar gesteigerten Betriebsstabilität und Pünktlichkeit beizutragen. Das Projekt soll zudem Erkenntnisse bringen, wie Fahrempfehlungen ausgestaltet werden müssen, um vom Lokpersonal akzeptiert und genutzt zu werden.

Durchführung des Pilotprojekts

Das Pilotprojekt dauerte von Januar bis August 2017 und umfasste die Projektphasen Datenaufbereitung, Testbestrieb und Evaluation (vgl. Grafik).



Im Rahmen der Datenaufbereitung wurde grossen Wert auf die Aufbereitung der Fahrplandaten gelegt. Dabei wurde nicht einfach auf die bestehenden betrieblichen Fahrpläne abgestützt, sondern zusammen mit der Fahrplanplanung der SBB die betrieblich relevanten Fixpunkte identifiziert (z.B. Kreuzungspunkte). Diese Fixpunkte mussten bei der anschliessenden Fahrprofilmodellierung zwingend eingehalten werden, während bei den übrigen Betriebspunkten Abweichungen vom betrieblichen Fahrplan zugelassen wurden, um mehr Spielräume für das energiesparende Fahren zu ermöglichen.

Im Rahmen des Testbetriebs wurden drei verschiedene Fahrempfehlungssysteme getestet (vgl. Fotos auf der nächsten Seite):

1) Papier-Fahrordnung: Statische Fahrempfehlungen auf Papier, die durch SBB-I modelliert wurden
2) Energymiser: Dynamisches, auf einem Tablet umgesetztes Fahrempfehlungssystem der australischen Firma TTG
3) GreenSpeed: Dynamisches, auf einem Tablet umgesetztes Fahrempfehlungssystem der dänischen Firma Cubris

Die Testfahrten wurden auf der S44 zwischen Burgdorf (BDF) - Bern (BN) - Belp (BP) - Thun (TH) mit 4-teiligen RABe 525 NINA Triebzügen durchgeführt, die mit Energiemesssystemen ausgerüstet sind. Zusätzlich fanden mit dem System Energymiser noch Testfahrten auf der S3 zwischen Belp-Bern-Biel mit RABe 515 MUTZ Triebzügen statt.

[1] Im vorliegenden Text wird zur Vereinfachung ausschliesslich die männliche Form verwendet. Lokführerinnen sind stets mitgemeint.
[2] https://www.sbbrcs.ch/systemfamilie/rcs-adl/

Die Testfahrten wurden mit acht Testlokführern durchgeführt, die aufgefordert wurden, die Fahrempfehlungen möglichst genau umzusetzen, wobei Sicherheit und Pünktlichkeit stets die oberste Priorität behielten.
Die Evaluation bestand aus einem Vergleich der theoretischen modellierten Ideal-Fahrprofile mittels Simulation, aus quantitativen Auswertungen zu den gemessenen Energieverbräuchen und zur Pünktlichkeit und aus Interviews mit den involvierten Testlokführern

Resultate und Erkenntnisse

Da die Ergebnisse aufgrund der unterschiedlich langen Testphasen und teilweise kleinen Stichproben keinen statistisch fundierten Vergleich zwischen den getesteten Systemen zulassen, werden die Ergebnisse im Bericht in anonymisierter Form präsentiert.

Energieverbrauch

Die Messdaten der Testfahrten zeigten, dass mit den drei getesteten Fahrempfehlungssystemen ähnlich hohe Einsparungen in der Höhe von 9 bis 16 Prozent des Gesamtenergieverbrauchs erzielt werden konnten:

Realisierte Energieeinsparungen (Differenz zwischen Median von Test- und Kontrollfahrten)

S44	System 1	System 2	System 3
Burgdorf-Thun	-16.2%	-15.1%	-10.2%
Thun-Burgdorf	-13.3%	-10.4%	-8.8%

S3	Energymiser (TTG)
Belp-Biel	-13.6%
Biel-Belp	-10.8%

Pünktlichkeit

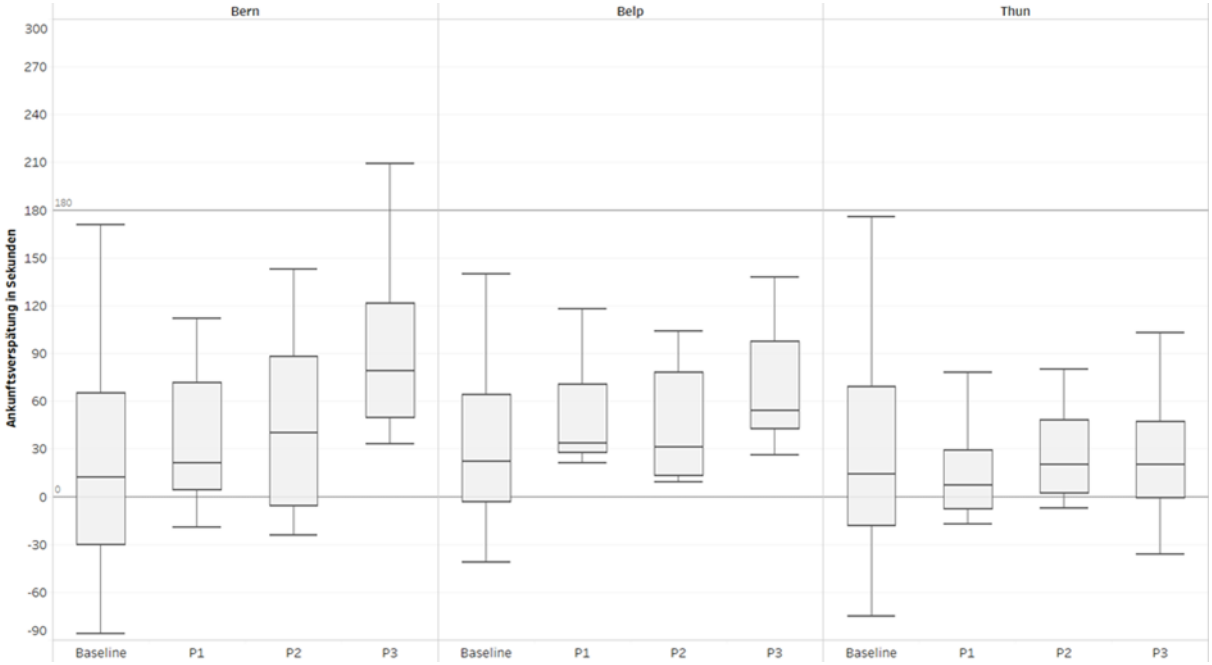
Es wurde analysiert, wie gut die betrieblichen Fahrplanzeiten an den definierten Fixpunkten eingehalten wurden. Die Analysen zeigten, dass die Streuung der Zeit (Verspätung, Frühzeitigkeit) durch alle drei getesteten Systeme gegenüber den unbeeinflussten Fahrten reduziert werden konnten – die Fahrempfehlungen führten also zu einer einheitlicheren Fahrweise.

Die Pünktlichkeit bei den Testfahrten bewegte sich für alle drei getesteten Systeme und für die meisten Betriebspunkte auf einem vergleichbar hohen Niveau im Vergleich zu den unbeeinflussten Fahrten. Dies bedeutet, dass die Energieeinsparungen nicht zulasten der Pünktlichkeit gingen. Für gewisse Betriebspunkte konnten aber je nach System relativ grosse Abweichungen beobachtet werden (z.B. System 3 in Bern, vgl. Abbildung auf nächster Seite). Diese konnten teilweise auf Lücken bei den Topologiedaten und teilweise auf eine zu optimistische Verteilung der Fahrzeitreserven zurückgeführt werden.

Ankunftsverspätungen je Fixpunkt, S44, Fahrtrichtung Burgdorf-Thun (anonymisiert)

Boxplotdarstellung: Die Box bildet das 25%-Perzentil (untere Beschränkung der Box), das 75%-Perzentil (obere Beschränkung) sowie den Median (Linie dazwischen) ab. Die Antennen bezeichnen maximal den 1.5-fachen Interquartil-Abstand.)

P1, P2, P3 bezeichnen die drei getesteten Systeme, Baseline steht für die unbeeinflussten Kontrollfahrten.



Akzeptanz beim Lokpersonal

Alle drei getesteten Fahrprofile wurden von den Testlokführern als gut modelliert eingeschätzt und konnten im effektiven Betrieb gut umgesetzt werden. Für die Lokführer war überraschend, wie stark die Geschwindigkeiten reduziert bzw. wie früh ausgerollt werden konnte, ohne am Endbahnhof verspätet zu sein.

Die Lokführer konnten mit den zusätzlichen Informationen gut umgehen und erlebten insbesondere die Transparenz über den betrieblichen Fahrplan als positiv. Bei den dynamischen Systemen gab es jedoch sehr unterschiedliche Rückmeldungen. Den Lokführern ist vor allem wichtig, dass die Fahrempfehlungen vorausschauend und für den Lokführer berechenbar sind, nicht zu oft ausgegeben und korrigiert werden und geschlossenen Signalen / Vorsignalen nicht direkt widersprechen.

Vielen Lokführern ist es wichtig, eigene Spielräume beim Fahren zu behalten. Teilweise war eine Angst vor Überwachung und längerfristig auch Automatisierung des Fahrens spürbar, die es bei Einführung von Fahrempfehlungen zu beachten gilt.

Schlussfolgerungen

Aus Sicht des Projektteams können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1) Im S-Bahn-Verkehr können durch Fahrempfehlungen Energieeinsparungen beim Gesamtverbrauch von bis zu 10-15 Prozent erwartet werden.
2) Einsparungen in dieser Höhe sind nur möglich, wenn die Flexibilitäten zwischen den Fixpunkten des betrieblichen Fahrplans voll genutzt werden.
3) Fahrempfehlungen tragen dazu, die Streuung der Fahrweisen zu reduzieren.
4) Fahrempfehlungen können eine hohe Pünktlichkeit gewährleisten. Das Pilotprojekt zeigte, dass dabei die Datenqualität und –verfügbarkeit eine wichtige Rolle spielt und bei der Verteilung der Zeitreserven behutsam vorgegangen werden muss.
5) Auch mit statischen Fahrempfehlungen können hohe Energieeinsparungen erzielt werden. In diesem Fall ist die Beobachtung der Pünktlichkeitsentwicklung speziell wichtig, da die Lokführer den Zeitabgleich jeweils „manuell“ machen müssen.
6) Die Wirkung eines Fahrempfehlungssystems in der Praxis hängt weniger von der Güte der Fahrprofil-Modellierung ab, als vielmehr von der Art und Weise, wie die Informationen und Empfehlungen angezeigt und letztendlich vom Lokpersonal umgesetzt werden.

7) Die Art der Empfehlungen, die Systemparametrisierung (wie oft werden Fahrempfehlungen neu berechnet und neu ausgegeben) und die Gestaltung der Anzeige haben einen grossen Einfluss auf die Akzeptanz beim Lokpersonal und damit auch den Umsetzungsgrad der Fahrempfehlungen.
8) Bei der Einführung von Fahrempfehlungen muss darauf geachtet werden, dass keine gefährlichen Widersprüche zwischen den Empfehlungen und geschlossenen (Vor-)Signalen auftreten. D.h. die Fahrempfehlungen sollten mit ADL bzw. RCS verknüpft werden.
9) Insgesamt bestätigte das Pilotprojekt klar, dass ein Fahrempfehlungssystem ins Gesamtsystem eingebettet werden muss und in enger Abstimmung aller involvierten Akteure (EVU, Fahrplanplanung und Infrastruktur Betrieb) erfolgen sollte.

Résumé en français

Situation initiale

Actuellement, il n'existe pas chez BLS de directive claire précisant à partir de quel moment et dans quelle mesure les réserves de temps de parcours doivent être utilisées pour une conduite économe en énergie. Chaque mécanicien[3] sur locomotive a donc développé sa propre stratégie de conduite et les modes de conduite varient relativement entre les mécaniciens sur locomotive et selon la situation. De plus, il manque aux mécaniciens sur locomotive des informations importantes pour pouvoir adopter la conduite la plus efficace possible sur le plan énergétique, dans le cadre d'une stratégie intégrée dans la structure de l'horaire.

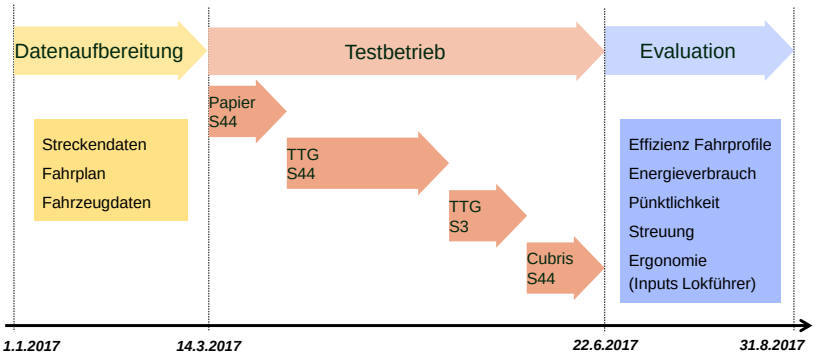
Utilisé depuis fin 2015 par BLS, le système de *régulation adaptative*[4] (ADL) permet d'éviter les arrêts inutiles avant les signaux d'arrêt. En cas d'avance, le système ADL recommande des vitesses réduites pour garantir une conduite économe (fonction ADL Eco). Toutefois, ADL et surtout ADL Eco sont rarement utilisés sur le réseau RER. Partant de ce constat, les recommandations de conduite pour l'exploitation régulière testées dans le cadre du projet pilote doivent être considérées comme des ajouts/compléments importants et nécessaires au système ADL.

Problématique

Le projet pilote doit apporter une réponse à la question suivante : les recommandations de conduite sont-elles un outil adapté pour le personnel des locomotives leur permettant de diminuer de manière rentable les coûts de courant de traction et, dans le même temps, de contribuer à une stabilité de l'exploitation et à une ponctualité inchangées, voire optimisées ? Le projet doit également livrer des enseignements sur la manière de concevoir les recommandations de conduite afin qu'elles soient acceptées et utilisées par le personnel des locomotives.

Exécution du projet pilote

Le projet pilote a eu lieu de janvier à août 2017 et a englobé trois phases : la préparation des données, la phase de test et l'évaluation (cf. graphique).



Lors de la préparation des données, une grande importance a été accordée à la préparation des données d'horaire. BLS ne s'est pas seulement appuyé sur les horaires d'exploitation actuels, mais a également identifié les points fixes pertinents pour l'exploitation (par ex. points de croisement), en collaboration avec la planification d'horaire des CFF. Ces points fixes ont dû être impérativement respectés lors de la modélisation du profil de parcours effectuée ensuite. Pour les autres points d'exploitation, des écarts par rapport à l'horaire opérationnel étaient autorisés afin de laisser aux mécaniciens sur locomotive une plus grande marge de manœuvre pour la conduite économe en énergie.

Trois systèmes de recommandation de conduite ont été testés pendant la phase de test (cf. photos en page suivante) :

1) marche de train sur papier : recommandations de conduite statiques sur papier modélisées par CFF-I ;
2) Energymiser : système de recommandation de conduite dynamique sur tablette, fourni par l'entreprise australienne TTG ;
3) GreenSpeed : système de recommandation de conduite dynamique sur tablette, fourni par l'entreprise danoise Cubris.

[3] À des fins de lisibilité, seule la forme masculine est utilisée dans le présent texte. Les mécaniciennes sur locomotive sont toujours sous-entendues.
[4] https://www.sbbrcs.ch/fr/famille/rcs-adl/

Les trajets d'essai ont été effectués sur le S44 entre Burgdorf (BDF) - Bern (BN) - Belp (BP) - Thun (TH) avec des rames automotrices à quatre éléments RABe 525 NINA dotées de systèmes de mesure de l'énergie. Des trajets d'essai ont également eu lieu sur le S3 entre Belp-Bern-Biel/Bienne avec les rames automotrices RABe 515 MUTZ.

Les trajets d'essai ont été effectués avec huit mécaniciens sur locomotive à qui l'on a demandé de respecter à la lettre les recommandations de conduite, tout en accordant la priorité à la sécurité et à la ponctualité.
L'évaluation était composée de plusieurs éléments : une comparaison entre les profils de marche théoriques modélisés par le biais d'une simulation, les analyses quantitatives sur les consommations d'énergie mesurées et sur la ponctualité, et le feed-back des mécaniciens sur locomotive ayant participé au projet.

Résultats et enseignements

En raison des phases d'essai de durée différente et des en partie petits contrôles aléatoires, les résultats ne permettaient pas d'établir une comparaison statistique fondée entre les différents systèmes testés. Par conséquent, les résultats sont présentés de manière anonyme dans le rapport.

Consommation d'énergie

Les données de mesure des trajets d'essai ont montré que les trois systèmes de recommandation de conduite testés ont permis d'atteindre une réduction similaire de la consommation totale d'énergie, comprise entre 9 et 16 % :

Économies d'énergie réalisées (différence entre la médiane des trajets d'essai et des trajets de contrôle)

RER 44	Système 1	Système 2	Système 3
Burgdorf-Thun	-16,2 %	-15,1 %	-10,2 %
Thun-Burgdorf	-13,3 %	-10,4 %	-8,8 %

RER 3	Energymiser (TTG)
Belp-Biel/Bienne	-13,6 %
Biel/Bienne-Belp	-10,8 %

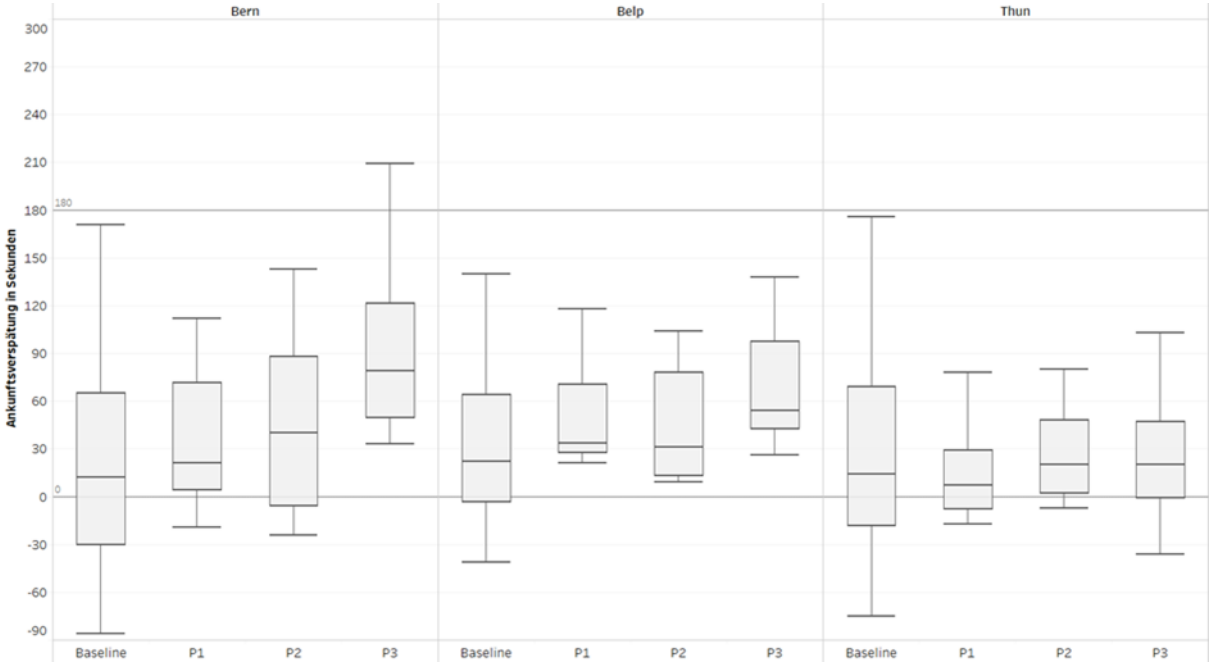
Ponctualité

Des analyses ont été effectuées pour déterminer dans quelle mesure les horaires opérationnels ont été respectés au niveau des points fixes définis. D'après ces analyses, il s'avère que les trois systèmes ont permis une diminution de la variabilité du temps (retard, avance) par rapport aux trajets non influencés par des systèmes de recommandation de conduite. Les recommandations ont donc contribué à un mode de conduite plus homogène.

Pour les trois systèmes testés et pour la majorité des points d'exploitation, la ponctualité constatée lors des trajets d'essai est restée élevée par rapport aux trajets non influencés par des systèmes de recommandation de conduite. Ceci signifie que les économies d'énergie ne se font pas au détriment de la ponctualité. Cependant, des écarts relativement importants ont été observés d'un système à l'autre pour certains points d'exploitation (par ex. système 3 à Berne, cf. schéma en page suivante). Ces écarts peuvent s'expliquer par des lacunes au niveau des données topologiques et par une répartition trop optimiste des réserves de temps de parcours.

Retards à l'arrivée par point fixe, S44, direction Burgdorf-Thun (anonyme)

Représentation par un diagramme en boîte : le diagramme représente le centile 25 (description inférieure du diagramme), le centile 75 (limite supérieure) et la médiane (ligne entre les deux). Les antennes désignent au maximum 1,5 fois l'écart interquartile.)



P1, P2, P3 désignent les trois systèmes testés, la ligne de base désigne les trajets de contrôle effectués sans système de recommandation de conduite.

Acceptation par le personnel des locomotives

Selon les retours des mécaniciens sur locomotive chargés des tests, les trois profils de conduite testés ont été bien modélisés et ont pu être mis en œuvre correctement dans le cadre de l'exploitation réelle. Les mécaniciens sur locomotive ont été agréablement surpris par l'ampleur de diminution de vitesse et/ou par la distance sur laquelle le freinage pouvait être anticipé sans causer de retard en gare terminus.

Ils ont correctement géré les informations supplémentaires et ont notamment apprécié la transparence de l'horaire d'exploitation. En revanche, les retours des mécaniciens sur locomotive à propos des systèmes dynamiques sont très divergents. Pour les mécaniciens sur locomotive, il est important de pouvoir anticiper et prévoir les recommandations de conduite. De même, ils souhaitent qu'elles ne s'affichent et ne nécessitent pas trop souvent de corrections et qu'elles ne contredisent pas directement les signaux/avant-signaux fermés.

Beaucoup de mécaniciens sur locomotive attachent de l'importance à disposer d'une certaine marge de manœuvre pendant la conduite. Parfois, la peur d'être surveillé et de subir à long terme une automatisation de la conduite était perceptible. Il convient de prendre en compte ces craintes lors de l'introduction de recommandations de conduite.

Conclusions

L'équipe du projet a pu tirer les conclusions suivantes :

1) grâce aux recommandations de conduite, des économies d'énergie de 10 à 15 % peuvent être réalisées sur le trafic RER ;
2) de telles économies ne sont possibles que si la flexibilité entre les points fixes de l'horaire opérationnel est pleinement exploitée ;
3) les recommandations de conduite permettent de réduire la dispersion dans la manière de conduire ;
4) elles peuvent garantir une ponctualité élevée ; le projet pilote a montré que la qualité et la disponibilité des données avaient une grande importance et qu'il fallait faire preuve de prudence dans la répartition des réserves de temps ;

5) les recommandations de conduite statiques permettent également de réaliser d'importantes économies d'énergie ; dans de tels cas, l'observation de l'évolution de la ponctualité était particulièrement importante, car les mécaniciens sur locomotive devaient ajuster « manuellement » les temps ;
6) l'efficacité d'un système de recommandation de conduite dans la pratique dépend moins de la qualité de la modélisation du profil de marche que de la manière dont les informations et les recommandations sont affichées puis mises en œuvre par le personnel des locomotives ;
7) le type de recommandations, le paramétrage du système (fréquence de calcul et d'émission des recommandations de conduite) et la conception de l'affichage jouent un rôle important dans l'acceptation de tels systèmes par le personnel des locomotives et le degré de mise en œuvre des recommandations de conduite ;
8) lors de l'introduction de recommandations de conduite, il faut veiller à éviter des contradictions dangereuses entre les recommandations et les signaux et avant-signaux fermés ; en d'autres termes, les recommandations de conduite doivent être reliées à ADL et/ou RCS ;
9) d'une manière générale, le projet pilote a clairement confirmé qu'un système de recommandation de conduite devait être intégré dans le système global et que son introduction devait intervenir en étroite collaboration avec tous les acteurs impliqués (ETF, planification d'horaire et exploitation de l'infrastructure).

1. Ausgangslage[5]

Es wird vielfach behauptet, dass das Einsparpotenzial durch energiesparendes Fahrverhalten beträchtlich ist, wobei aber kaum verlässliche Zahlen für den Schweizer Kontext vorliegen. Bei der BLS wurde das Thema ‚energiesparendes Fahren' in den letzten Jahren zudem stiefmütterlich behandelt. Aus diesem Grund hat die BLS AG Mitte 2016 ein Pilotprojekt gestartet, um im Rahmen eines ausgedehnten Pilotversuchs Erfahrungen mit Fahrempfehlungssystemen zu sammeln und die Einsparpotenziale einer energiesparenden Fahrweise im S-Bahn-Verkehr realistisch abschätzen zu können.

Der Lokführer hat den Zug sicher, pünktlich und für den Reisenden komfortabel zu führen. Nach Möglichkeit ist wirtschaftlich zu fahren.[6]

Diese Anweisung stand im Fokus des Startworkshops zum Pilotprojekt. Es zeigte sich, dass es keine klare Vorgabe gibt, ab wann und in welchem Umfang Fahrzeitreserven für energiesparendes Fahren zu nützen sind. Dies führt dazu, dass jeder Lokführer[7] eine eigene Fahrstrategie entwickelt und die Fahrweisen zwischen den Lokführern und je nach Gegebenheit relativ weit streuen. Zudem kennen die Lokführer nur den Kundenfahrplan, nicht aber den betrieblichen Fahrplan (vgl. Kasten). Es fehlen ihnen damit Informationen, um – eingebettet ins Fahrplangefüge – möglichst energieeffizient fahren zu können.

Betrieblicher Fahrplan versus Kundenfahrplan:
Der betriebliche Fahrplan basiert auf mittels Zuglaufrechnung berechneten, exakten Fahrzeiten, ergänzt um Reserven (Baureserven, Haltezeitreserven, allgemeine Fahrzeitreserven). Er wird ins Rail Control System (RCS) übergeben und bildet die Basis für die Überwachung des Betriebs durch die Betriebsleitzentralen.

Der Kundenfahrplan wird vom betrieblichen Fahrplan abgeleitet. Er wird auf Minuten gerundet und bezüglich Abfahrtszeiten so gelegt, dass er nie hinter dem betrieblichen Fahrplan liegt. Der Kundenfahrplan weicht deshalb vom betrieblichen Fahrplan ab und ist in der Praxis nicht immer eins zu eins fahrbar.

Das seit Ende 2015 auch bei der BLS eingesetzte System *adaptive Lenkung* (ADL)[8] dient dazu, unnötige Stopps vor Haltesignalen zu vermeiden. Bei Vorzeitigkeit empfiehlt ADL zudem reduzierte Geschwindigkeiten für energiesparendes Fahren (Funktion ADL Eco). ADL und vor allem ADL Eco kommen im S-Bahn-Verkehr aber nur selten zum Einsatz – vor diesem Hintergrund sind die im Rahmen des Pilotprojekts getesteten Fahrempfehlungen für den Regelbetrieb als wichtige und notwendige Ergänzung / Komplementierung zum System ADL zu betrachten.

2. Ziel der Arbeit

Das Pilotprojekt soll für den S-Bahn-Betrieb zeigen, inwiefern folgende Ziele über optimierte Fahrprofile und Fahrempfehlungen an das Lokpersonal erreicht werden können:

- Einsparung Bahnstromverbrauch (um mindestens 5%)
- Reduktion der Streuung der Fahrweise
- Mindestens gleich hohe Pünktlichkeit und Betriebsstabilität

Das Projekt soll zudem Erkenntnisse liefern, wie Fahrempfehlungen ausgestaltet sein müssen, um vom Lokpersonal akzeptiert und genutzt zu werden und die Sicherheit nicht zu beeinträchtigen.

Die Ergebnisse des Pilotprojekts sollen also insgesamt eine Antwort auf die Frage liefern, ob Fahrempfehlungen für das Lokpersonal ein geeignetes Instrument sind, um die Bahnstromkosten auf wirtschaftliche Art und Weise zu senken und gleichzeitig zu einer unverändert hohen oder gar gesteigerten Betriebsstabilität und Pünktlichkeit beizutragen.

[5] Hinweis: Wesentliche Teile des vorliegenden Berichts entstammen folgendem Artikel:
Studer T., Graffagnino R., Schäfer R.: Fahrempfehlungen im S-Bahn-Betrieb: Pünktlich und energiesparend am Ziel, ETR SWISS, Nr. 10/2017, S. 75-80.
[6] Schweizerische Fahrdienstvorschriften FDV, Abschnitt R 300.13 Lokführer, Kapitel 3.3.1.
[7] Im vorliegenden Text wird zur Vereinfachung ausschliesslich die männliche Form verwendet. Lokführerinnen sind stets mitgemeint.
[8] https://www.sbbrcs.ch/systemfamilie/rcs-adl/

3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

3.1. Forschungsansatz

Beim vorliegenden Pilotprojekt handelt es sich um ein Praxisprojekt, d.h. der Fokus wurde darauf gelegt, verschiedene Fahrempfehlungen praxisorientiert im Rahmen von Testfahrten auf ihre Anwendbarkeit und Wirkung im S-Bahn-Verkehr der BLS zu testen. Die Aufarbeitung von anderen Studienerkenntnissen und wissenschaftlichen Beiträgen war nicht Teil des Projektrahmens.

Es wurde grossen Wert darauf gelegt, das Thema gesamtheitlich im Dreieck zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), Infrastrukturbetreiberin und Fahrplanplanung zu betrachten. Das Projekt erfolgte in enger Zusammenarbeit zwischen BLS AG, BLS Netz AG und SBB Infrastruktur.

3.2. Ausgestaltung des Pilotversuchs

Ausgewählte Strecke und Fahrzeuge

Die Testfahrten wurden auf der S44 zwischen Burgdorf (BDF) - Bern (BN) - Belp (BP) - Thun (TH) in beiden Richtungen durchgeführt. Die Strecke ist ca. 56 km lang und weist eine Fahrzeit von 60 bzw. 61 Minuten auf. Die Strecke verfügt sowohl über ein- wie doppelspurige Abschnitte, hat einzelne Abschnitte mit Gefälle (z.B. Seftigen-Uetendorf) sowie einen 6.3 km langen Tunnel-Abschnitt (Grauholz). Während der Testphase gab es keine Bauarbeiten mit Einfluss auf den Bahnbetrieb.

Auf der S44 werden 4-teilige RABe 525 NINA Triebzüge in Doppeltraktion eingesetzt, die mit maximal 140 km/h verkehren.

Abbildung 1: Strecke S44

Abbildung 2: RABe 525 NINA

Zusätzlich wurden im kleineren Rahmen Testfahrten auf der S3 zwischen Belp-Bern-Biel mit RABe 515 MUTZ Triebzügen durchgeführt.

Abbildung 3: Strecke S3

Abbildung 4: RABe 515 Mutz

Getestete Fahrempfehlungssysteme und Fahrprofile

Es wurden sowohl ein durch SBB-I berechnetes Fahrprofil mit einer Fahrempfehlung auf Papier, als auch externe dynamische Fahrempfehlungssysteme getestet (vgl. Tabelle 1). Für letztere wurde ein Einladungsverfahren durchgeführt und zwei Systeme – *Energymiser* der australischen Firma TTG[9] und *GreenSpeed* der dänischen Firma Cubris[10] – für das Pilotprojekt ausgewählt.

System	Modelliertes Fahrprofil	Charakter der Empfehlung	Ausgabe der Fahrempfehlung
Papier-Fahrordnung (Fahrprofil durch SBB-I berechnet)	Reduzierte konstante Geschwindigkeiten, ohne Ausrollen	Statisch (gemäss Fahrplan, bei pünktlichem Betrieb)	Papier
Energymiser (TTG)	Reduzierte Geschwindigkeiten, mit Ausrollen	dynamisch, GPS-basiert, mit real-time Berechnungen	Tablet
GreenSpeed (Cubris)	Reduzierte Geschwindigkeiten, mit Ausrollen	dynamisch, GPS-basiert mit real-time Berechnungen	Tablet

Tabelle 1: Übersicht über die getesteten Systeme

Im Folgenden werden die drei getesteten Systeme noch etwas detaillierter beschrieben:

Papier-Fahrordnung

Die Papier-Fahrordnung entspricht der heutigen Fahrordnung (Original-Fahrordnung auf dem Tablet, Rückfallebene auf Papier), die um zwei zusätzliche Spalten ergänzt wurde:

- Betriebliche Fahrplanzeiten (blaue Spalte, vgl. Erläuterung in Kapitel 1)
- Empfohlene Geschwindigkeiten je Abschnitt (grüne Spalte)

Die Papier-Fahrordnung ist eine statische Fahrempfehlung, die für den pünktlichen Betrieb gilt. Sobald der Zug verspätet ist, hat die Pünktlichkeit höhere Priorität und der Lokführer soll entsprechend schneller fahren. Sobald er die Verspätung eingeholt hat – dies kann er über die betrieblichen Fahrplanzeiten kontrollieren – kann er wieder nach Fahrempfehlung fahren.

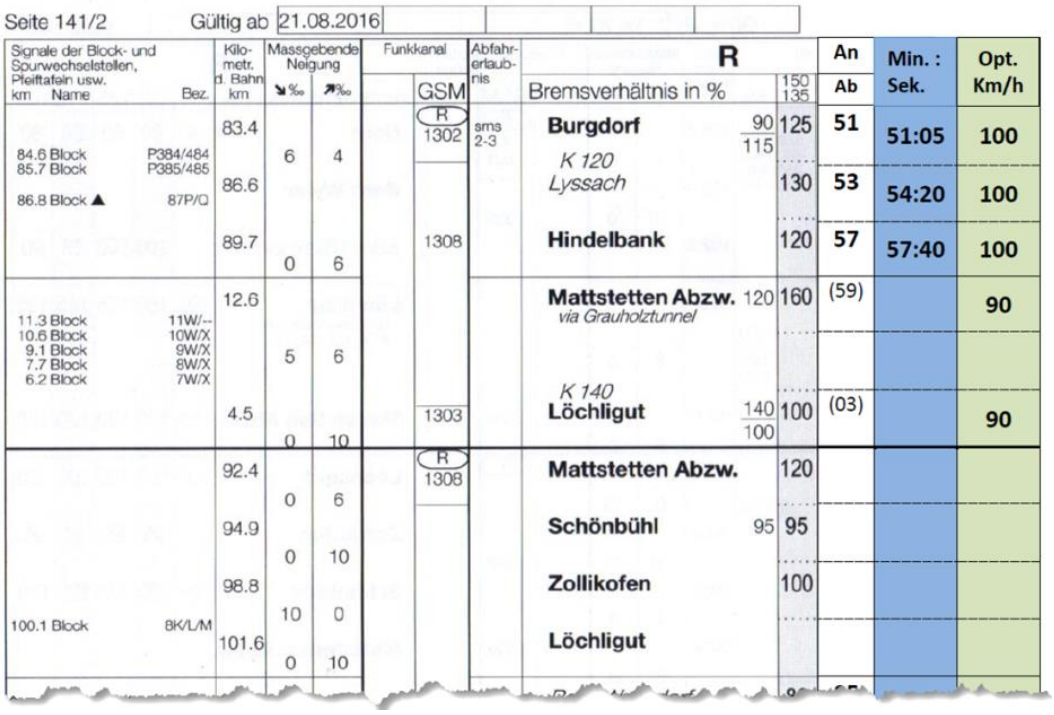


Abbildung 6: Papier-Fahrordnung

[9] http://www.ttgtransportationtechnology.com/energymiser
[10] http://www.cubris.dk/what-is-greenspeed/

Dynamische Systeme (Energymiser TTG und GreenSpeed Cubris)
Die beiden getesteten externen Systeme sind dynamische Systeme, die im Rahmen des Pilotprojekts auf einem Tablet getestet wurden. Basierend auf – in unserem Fall statischen – Inputdaten (Fahrplan-, Strecken- und Fahrzeugdaten) und aktuellen GPS-Daten überprüfen sie ihre jeweilige geografische und zeitliche Position und berechnen bei zu grosser Abweichung vom früher berechneten Fahrprofil in Echtzeit ein neues Fahrprofil mit angepassten Geschwindigkeiten.
In beiden Systemen werden die berechneten Geschwindigkeiten in Form von empfohlenen Geschwindigkeiten an das Lokpersonal ausgegeben. Zudem integrieren beide Systeme die Streckentopografie in ihre Empfehlungen und geben dem Lokführer an, in welchem Zeitpunkt er beispielsweise das Fahrzeug ausrollen lassen soll. Schliesslich informieren die Systeme den Lokführer ebenfalls über seine zeitliche Situation (Abweichung gegenüber dem geplanten betrieblichen Fahrplan).

Die beiden getesteten Systeme unterscheiden sich in Bezug auf die Darstellung der relevanten Informationen. Hier gilt es jedoch darauf hinzuweisen, dass es sich bei beiden Displays um „Standard"-Anzeigen des jeweiligen Anbieters handelt, die für Testfahrten benutzt werden. Sobald ein System implementiert wird, stellen die Anbieter eine hohe Flexibilität bezüglich Design in Aussicht und bieten an, dieses „taylor-made" gemeinsam mit dem Verkehrsunternehmen zu entwickeln.

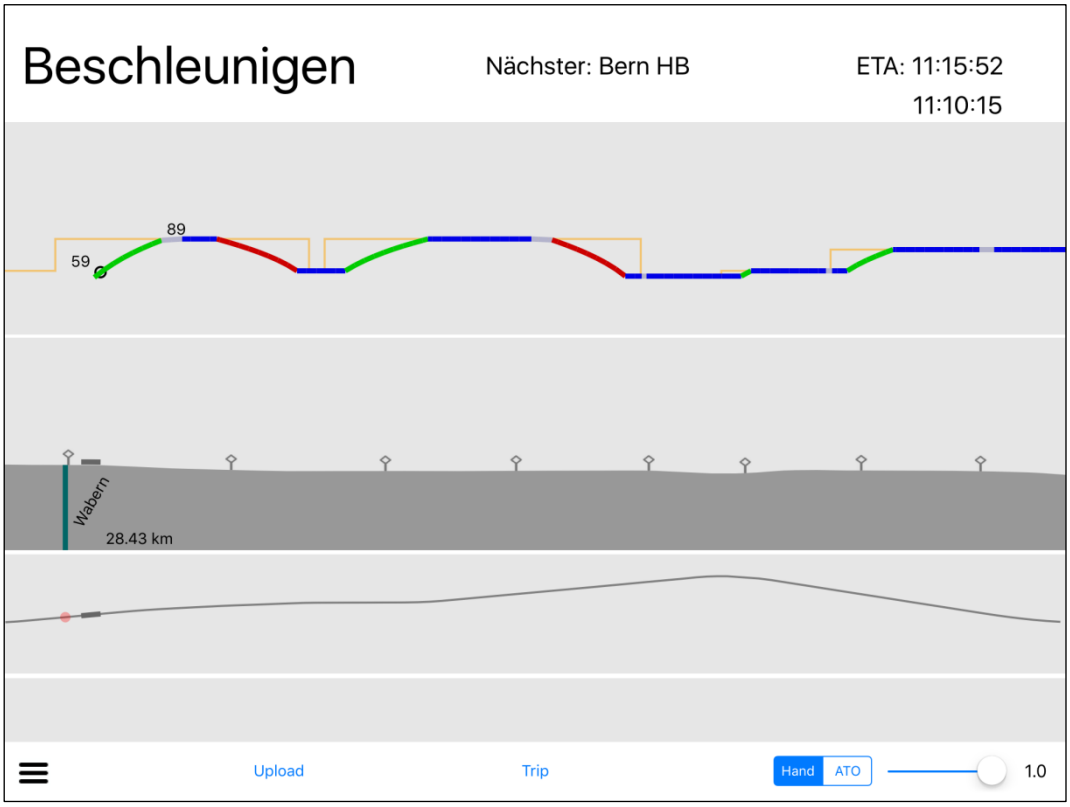


Abbildung 7: Energymiser-Display (TTG)

Die verwendete Anzeige von Energymiser (Abbildung 7) verfügt über vier Bereiche:
- Im obersten Bereich werden die Fahrempfehlungen (Beschleunigen / Geschwindigkeit halten / Ausrollen / Bremsen) ausgegeben, sowie die Information zum nächsten Haltepunkt inkl. geplanter Ankunftszeit.
- Im zweiten Bereich werden die erlaubten maximalen Geschwindigkeiten sowie das empfohlene Fahrprofil grafisch aufgezeigt.
- Im dritten Bereich sind die Streckentopografie sowie die Haltepunkte sowie Signalstandorte abgebildet.
- Im vierten Bereich ist die Kurvengeometrie ersichtlich.

Die drei unteren Bereiche verschieben sich – abhängig von der GPS-Position – von rechts nach links und erlauben dem Lokführer eine Vorausschau.

Die Anzeige von GreenSpeed (Abbildung 8) ist zweigeteilt:

- Im linken Teil werden die Streckeninformationen sowie die Fahrempfehlungen angezeigt:
  - Oben werden der nächste Haltepunkt sowie die geplante und erwartete Ankunftszeit angezeigt.
  - In der linken Spalte sieht man die nächsten Haltepunkte.
  - In der mittleren Spalte werden die Fahrempfehlungen ausgegeben (Geschwindigkeit oder auch die Empfehlung Ausrollen).
  - In der rechten Spalte sind die maximal zugelassenen Geschwindigkeiten ersichtlich.

  Die Informationen in den drei Spalten verschieben sich von oben nach unten und ermöglichen dem Lokführer damit eine Vorausschau.
- Der rechte Teil zeigt ergänzende Informationen (Fahrplan, Langsamfahrstellen, Karte).

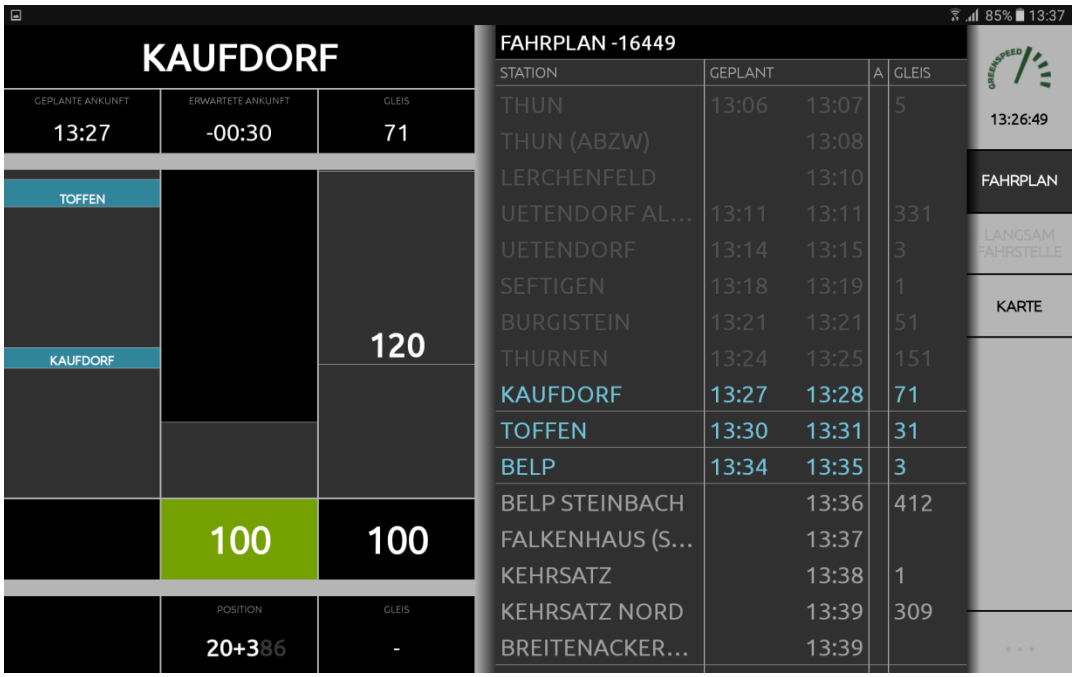


Abbildung 8: Display von GreenSpeed (Cubris)

Phasen des Pilotprojekts

Das Pilotprojekt gliederte sich in drei Projektphasen, wobei der Testbetrieb vier aufeinanderfolgende Testphasen umfasste (vgl. Abbildung 8). Die Datenaufbereitung betraf Streckendaten (Topologiedaten, Kilometrierungen und Geschwindigkeitsbegrenzungen), Fahrplandaten (Identifikation betriebliche Fixpunkte, vgl. Abschnitt 3.4) und Fahrzeugdaten (allgemeine Fahrzeugparameter, Traktions- / Bremsleistungen sowie Rollwiderstand). Die Evaluation umfasste quantitative Auswertungen von SBB-I (Energie und Pünktlichkeit) sowie qualitative Auswertungen der BLS (Interviews Testlokführer).

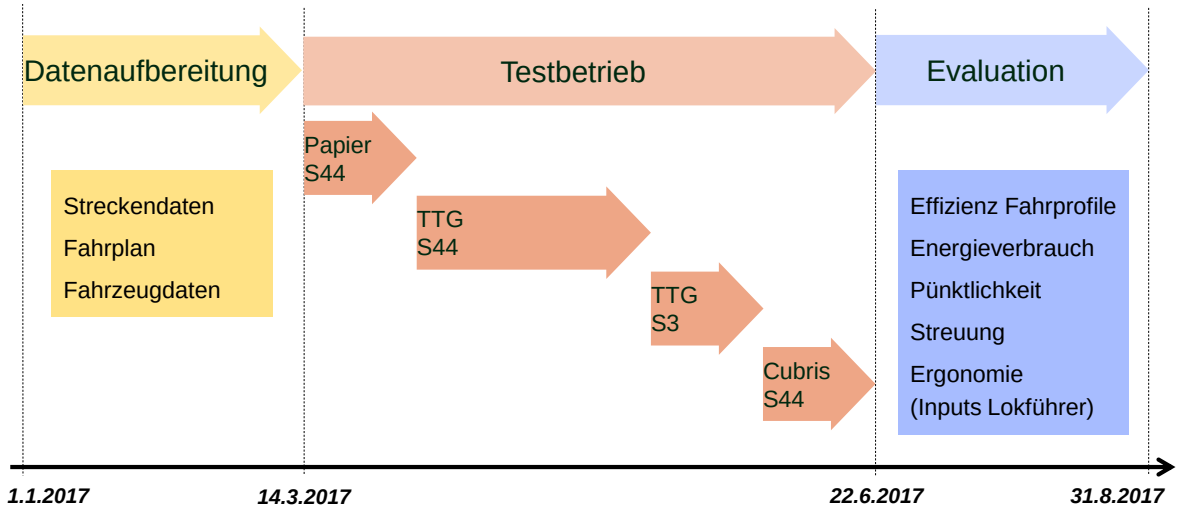


Abbildung 9: Phasen des Pilotprojekts

Fahrplanaufbereitung

Ausgangspunkt für die Fahrprofilberechnungen ist der betriebliche Fahrplan, für den in einem ersten Schritt die aus Betriebssicht zulässigen Spielräume identifiziert wurden. Dafür ist eine vertiefte Kenntniss der Fahrplanstruktur und der daraus resultierenden Fixpunkte für jeden Zug erforderlich. Die Analyse wurde von SBB-I mittels Ist-Verkehrsdaten mit dem Tool Open Timetable gemacht.

Die Zeit-Weg-Liniengrafik in Abbildung 2 zeigt farblich, welche Züge Verspätungen aufweisen (gelb, rot) und welche Züge pünktlich verkehren (blau, grün), wobei die Dicke der Einfärbung die Variation zwischen den täglichen Fahrten abbildet. Basierend darauf wurden für die S44 von Burgdorf nach Thun die Betriebspunkte Bern (wichtiger Umsteigeknoten), Wabern (Kreuzung), Belp (Kreuzung und wichtiger Halt), Uetendorf (Kreuzungsstation) sowie Thun (Endstation) als Fixpunkte definiert.

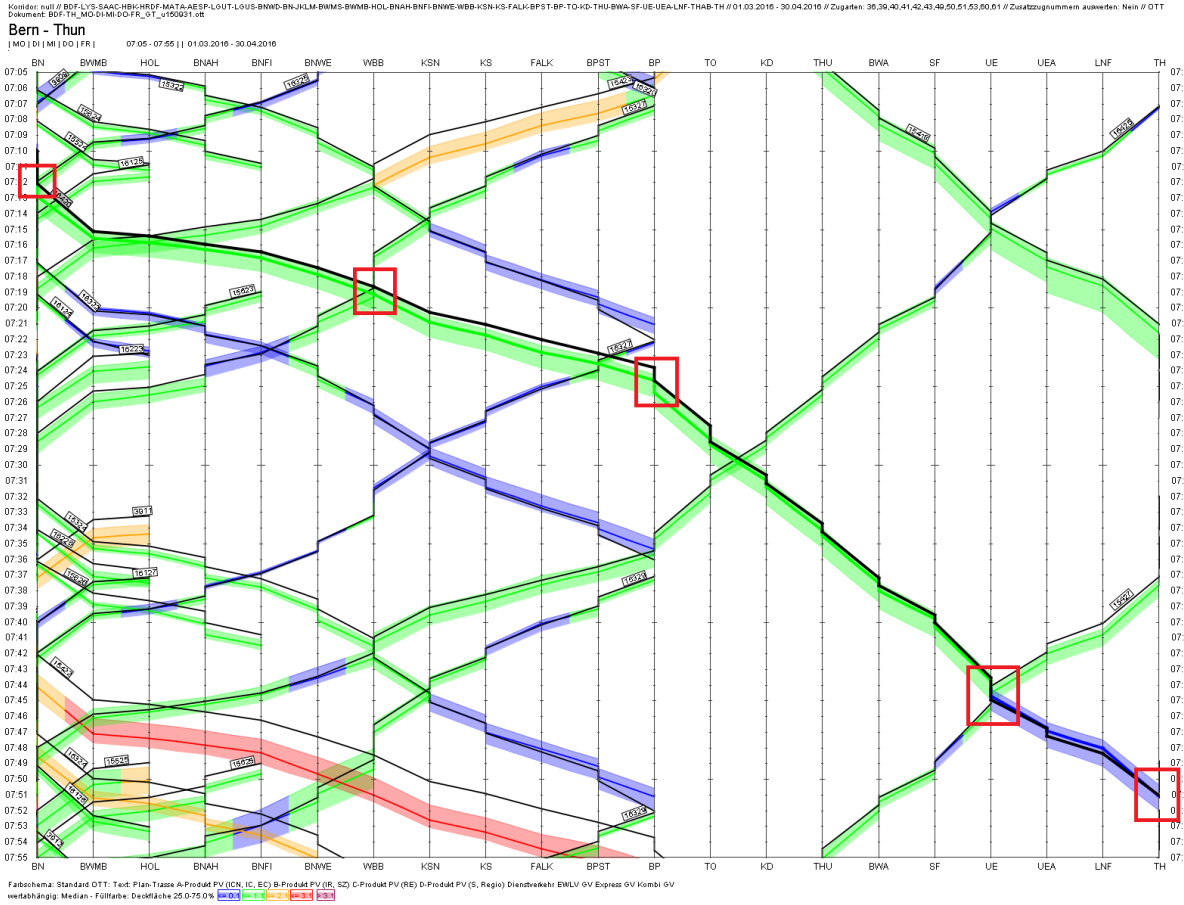


Abbildung 10: Zeit-Weg-Liniengrafik als Basis für die Identifizierung der betrieblichen Fixpunkte

Während diese Fixpunkte zwingend einzuhalten sind, dürfen die Fahrplanzeiten in den übrigen Betriebspunkten leicht angepasst werden (+/- 30 Sekunden), um ein energieeffizientes Fahrprofil zu ermöglichen. Dabei muss das Fahrprofil die tagesaktuellen Langsamfahrstellen berücksichtigen. Zusätzlich wurde für alle Haltepunkte geprüft, ob die Ankunftszeiten die Busanschlüsse nicht gefährden.

Für die Testfahrten auf der S3 wurde analog vorgegangen, um die Fixpunkte aus der Fahrplanstruktur zu bestimmen.

Organisation des Testbetriebs

Die Testfahrten wurden mit acht Testlokführern durchgeführt, bei deren Auswahl auf eine gute Mischung bezüglich Erfahrung geachtet wurde. Die Testlokführer erhielten eine Schulung und wurden auf ihren ersten Testfahrten jeweils begleitet. Sie wurden aufgefordert, die Fahrempfehlungen möglichst genau umzusetzen, wobei Sicherheit und Pünktlichkeit stets die oberste Priorität behielten.

An festgelegten Tagen wurden spezifische Testfahrten-Dienste auf der S44 bzw. S3 geplant, ohne die ordentliche Diensteinteilung anzupassen. Die Testlokführer waren als Zweitlokführer im Führerstand und konnten entweder den Zug selbst führen oder den eingeteilten Lokführer mit den Fahrempfehlungen anleiten. Jede Testfahrt wurde protokolliert und spezielle Vorkommnisse (z.B. Verspätung durch Signalhalt) festgehalten.

4. Ergebnisse

Da die Ergebnisse aufgrund der unterschiedlich langen Testphasen und teilweise kleinen Stichproben keinen statistisch fundierten Vergleich zwischen den getesteten Systemen zulassen, wurden die hier dargestellten Ergebnisse anonymisiert.[11]

4.1. Methodik zur Auswertung der Testfahrten

Bei der Auswertung wurde darauf geachtet, dass die Testfahrten und die unbeeinflussten Fahrten der Kontrollgruppen unter möglichst gleichen Bedingungen gemessen wurden. Die pro Testphase festgelegten Test- und Kontrollgruppen beziehen sich deshalb auf dieselben Zugnummern (gleiche Uhrzeiten) und für die Energieauswertung auf dieselbe Zeitperiode (vergleichbare Witterungsverhältnisse). Für die Pünktlichkeitsauswertung wurde nur eine Kontrollgruppe gebildet, basierend auf unbeeinflussten Fahrten vor Start der ersten Testfahrten.

Es wurden nur Fahrten ausgewertet, bei denen mindestens eines der in Doppeltraktion fahrenden Fahrzeuge mit einem Energiemesssystem ausgerüstet war. Einzelne Testfahrten, bei denen ein Traktionsausfall oder eine Umleitung auftrat, wurden ausgeschlossen. Weitere Einflussgrössen wie z.B. Abgangsverspätungen wurden nicht berücksichtigt, da dies die bereits kleinen Stichprobenmengen reduziert hätte.

Die Stichprobenzahlen für die drei Testphasen auf der S44 bewegen sich für die Testfahrten zwischen 17 und 39 und für die Kontrollfahrten zwischen 39 und 207 je Fahrtrichtung. Für die Pünktlichkeitsauswertung wurden ca. 60 Kontrollfahrten je Fahrtrichtung berücksichtigt.

Die Energieauswertungen der Testfahrten auf der S3 erfolgten mit derselben Methodik. Hier wurden je Richtung 30 Testfahrten und 98 bzw. 99 Kontrollfahrten ausgewertet.

4.2. Vergleich der Fahrprofile mittels Simulation

SBB-I bestimmte mit Hilfe eines Simulationstools den Traktionsenergieverbrauch der theoretisch errechneten idealen Fahrprofile der drei getesteten Systeme (vgl. Tabelle 2). Mittels einer solchen Simulation können äussere Einflüsse ausgeschlossen und die theoretischen Fahrprofile besser verglichen werden.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse zeigt Unterschiede von bis zu 12% zwischen den theoretischen Profilen. Das ist im Wesentlichen auf die unterschiedlichen Fahrstrategien (z.B. mit oder ohne Ausrollen) und auf unterschiedliche Fahrzeugmodellierungen (z.B. Luftwiderstand im Grauholztunnel) zurückzuführen.

Fahrtrichtung	**Fahrprofil 1 (kWh)**	**Fahrprofil 2 (kWh)**	**Fahrprofil 3 (kWh)**
Burgdorf-Thun	184.5	170.5	164.2
Thun-Burgdorf	178.7	157.7	160.7

Tabelle 2: Simulierte Traktionsenergieverbräuche für die S44 je Fahrprofil (anonymisiert)

Es wird darauf hingewiesen, dass die in Tabelle 2 aufgeführten Simulations-Werte nicht direkt mit den im nachfolgenden Kapitel 4.3 ausgewiesenen gemessenen Werten vergleichbar sind.
Während sich die Simulationsergebnisse nur auf den Traktionsenergieverbrauch beziehen, beinhalten die gemessenen Werte auch den Energieverbrauch für Heizung, Lüftung, Klima sowie Hilfsbetriebe. Zudem basiert die Modellierung auf Annahmen und Parametern, welche nicht vollständig mit der Realität übereinstimmen. Eine Unsicherheit besteht insbesondere bei den Parametern für den Fahrzeugspezifischen Luftwiderstand in Tunnelstrecken.

Nichtdestotrotz lässt die Simulation einen fairen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Fahrprofilen zu und gibt eine realistische Grössenordnung der Abweichungen zwischen den einzelnen Fahrprofilen.

[11] Die Anordnungen und Nummerierungen der Fahrprofile bzw. Fahrempfehlungssysteme sind zufällig und differieren zwischen den einzelnen Tabellen und Abbildungen (doppelte Anonymisierung).

4.3. Energieverbrauch: Ergebnisse aus den Testfahrten

Die folgende Energieauswertung basiert auf Messwerten zu den Gesamt-Nettoverbräuchen, d.h. Gesamtenergiebezug (Traktion, Heizung Lüftung Klima und Hilfsbetriebe) minus rekuperierte Energie. Sie werden jeweils als Boxplots (vgl. Kasten) dargestellt.

Boxplot-Darstellung:

Die Box bildet das 25%-Perzentil (untere Beschränkung der Box), das 75%-Perzentil (obere Beschränkung) sowie den Median (Linie dazwischen) ab. Die Antennen (whiskers) bezeichnen maximal den 1.5-fachen Interquartil-Abstand.

Wie in den Abbildungen ersichtlich, bewegen sich die Einsparungen gegenüber der Kontrollgruppe (Differenz der Medianwerte) bei allen getesteten Systemen auf einem ähnlichen Niveau:

- Zwischen 10.2 und 16.2% in Fahrtrichtung Burgdorf-Thun
- Zwischen 8.8 und 13.3% in Fahrtrichtung Thun-Burgdorf

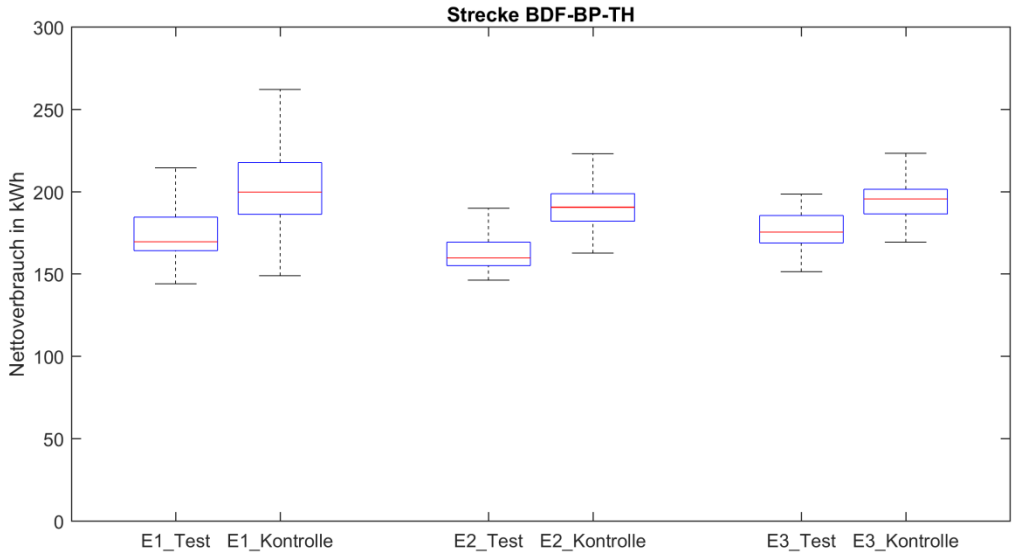


Abbildung 11: Energieverbräuche für Test- und Kontrollgruppen, S44, Fahrtrichtung Burgdorf-Thun (anonymisiert)

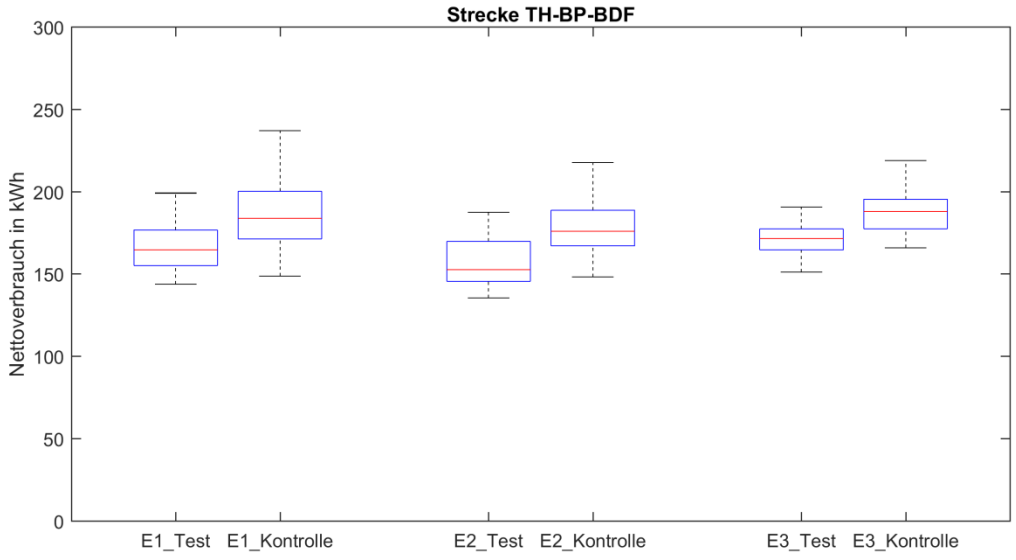


Abbildung 12: Energieverbräuche für Test- und Kontrollgruppen, S44, Fahrtrichtung Thun-Burgdorf (anonymisiert)

Bei den zusätzlichen Testfahrten auf der S3 wurden Einsparungen von 13.6% (Belp-Biel) bzw. 10.8% (Biel-Belp) registriert.

4.4. Pünktlichkeit und Streuung

Die Fahrprofile hatten die Vorgabe, die Ankunfts- und Abfahrtszeiten in den Fixpunkten einzuhalten. Die Analyse der Einhaltung dieser Zeiten wurde für beide Fahrtrichtungen an allen Fixpunkten gemacht. Die Betriebszentrale hat während den Testfahrten keine Abweichungen gegenüber dem Normalbetrieb registriert. Und mit den beschränkten Testdatenmengen konnten auch in Bezug auf die Pünktlichkeitsschwelle von 3 Minuten keine besonderen Auswirkungen festgestellt werden. Deshalb wurden die Verspätungen in Form von Boxplots analysiert. Die Abbildungen 12 und 13 zeigen die Ergebnisse für die Betriebspunkte Bern, Belp, Thun (Fahrtrichtung Burgdorf-Thun) und Belp, Bern, Burgdorf (Fahrtrichtung Thun-Burgdorf). Die Kontrollgruppe ist mit Baseline bezeichnet, die Testgruppen mit P1, P2 und P3.

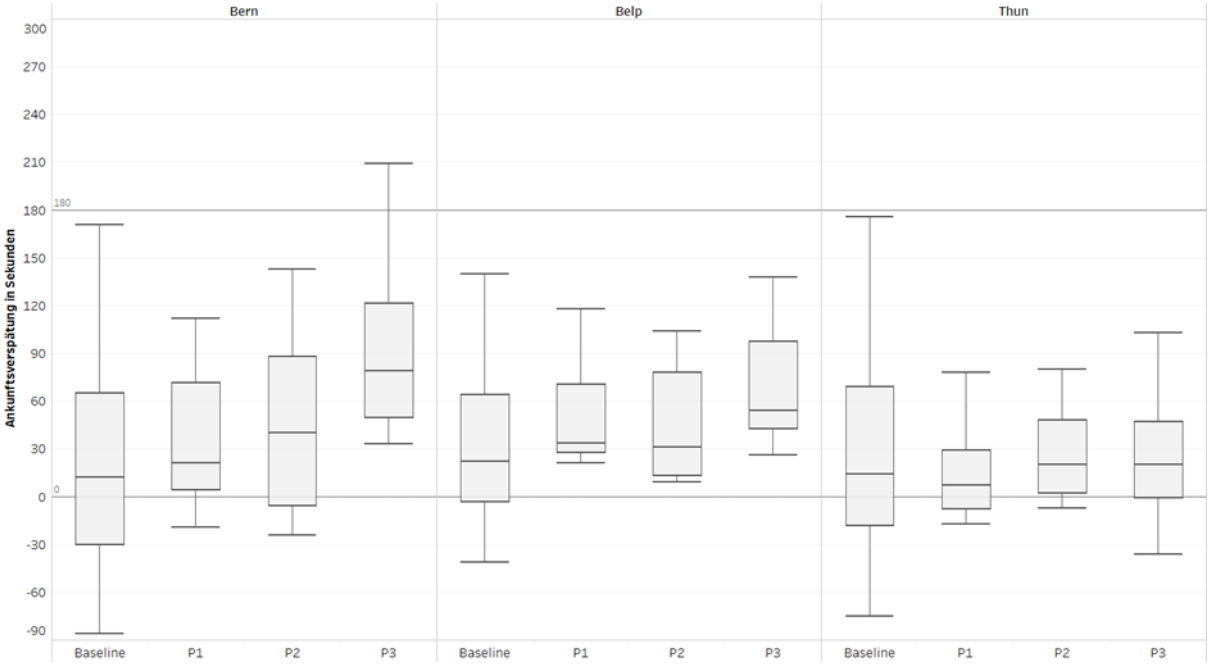


Abbildung 13: Ankunftsverspätungen je Fixpunkt, S44, Fahrtrichtung Burgdorf-Thun (anonymisiert)

Am Endbahnhof Thun ermöglichten alle drei Systeme einen ähnlich guten Median wie die Kontrollgruppe (Abbildung 12). Am Endbahnhof Burgdorf führten zwei Systeme zu einem verschlechterten Median (Abbildung 13). Wie erwartet ist die Zahl der vorzeitigen Ankünfte stark gesunken.

Die Streuung konnte durch alle getesteten Systeme reduziert werden, wobei ein System (P1) hervorsticht, während ein anderes (P2) für einzelne Fixpunkte auch schlechter abschneidet.

Auf Abbildung 12 können – insbesondere für P3 – Verspätungen bei der Ankunft in Bern festgestellt werden, da die realisierten Fahrzeiten im letzten Streckenabschnitt vor Bern über den berechneten Fahrzeiten lagen. Dies liegt einerseits an der mangelnden Verfügbarkeit von fahrweggenauen Topologiedaten. Andererseits zeigte sich, dass auf diesem vielbefahrenen Abschnitt häufig betriebliche Verzögerungen auftreten, für die in den Fahrprofilen zu wenig Fahrzeitreserven eingeplant wurden.

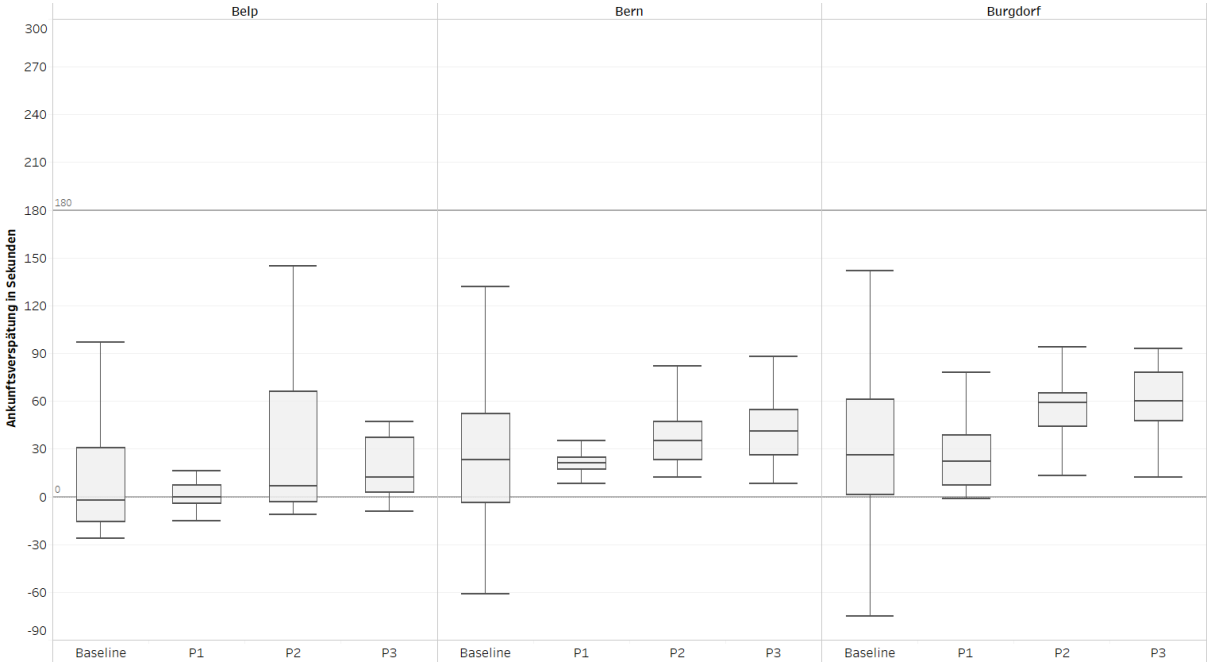


Abbildung 14: Ankunftsverspätungen je Fixpunkt, S44, Fahrtrichtung Thun-Burgdorf (anonymisiert)

4.5. Akzeptanz beim Lokpersonal

Mit den Testlokführern wurden detaillierte Interviews geführt, in denen ihre persönlichen Eindrücke sowie die Reaktionen der anderen Lokführer abgefragt wurden.

Modellierung und Fahrbarkeit der Fahrprofile
Alle drei getesteten Fahrprofile wurden von den Testlokführern als gut modelliert eingeschätzt und konnten im effektiven Betrieb gut umgesetzt werden. Für die Lokführer war überraschend, wie stark die Geschwindigkeiten reduziert bzw. wie früh ausgerollt werden konnte, ohne am Endbahnhof verspätet zu sein. Selbst in den Hauptverkehrszeiten konnte teilweise energiesparend gefahren werden.

Ergonomie
Die Lokführer schätzen die Informationen zum betrieblichen Fahrplan. Sie schaffen Transparenz und werden insbesondere für die Ausbildung als hilfreich eingestuft. Die Kenntnis des betrieblichen Fahrplans und die reduzierten Geschwindigkeiten führten für mehrere Lokführer zu einer positiv erlebten Entschleunigung beim Fahren. Andererseits machte die langsame Fahrweise einzelne Lokführer auch etwas nervös. Insgesamt sind die Testlokführer der Ansicht, dass sie mit zusätzlichen Informationen umgehen können, ohne dass die Sicherheit darunter leidet.

Die statische Fahrempfehlung wurde als sehr nützlich und gut anwendbar empfunden, selbst im Verspätungsfall. In der Praxis holten die Testlokführer eine Verspätung nach eigenem Ermessen auf und wechselten dann auf die Fahrempfehlung.

Die dynamischen Fahrempfehlungen konnten grundsätzlich jederzeit gut angewendet werden, wobei folgende Punkte betont wurden:

- Wichtig ist eine vorausschauende Fahrempfehlung – d.h. der Lokführer möchte frühzeitig auf die nächsten Schritte vorbereitet werden.
- Fahrempfehlungen dürfen Signalen oder Vorsignalen nicht direkt widersprechen, da dies zu Unsicherheiten beim Lokführer führen würde. Ebenfalls werden Bremsempfehlungen als heikel eingestuft.
- Fahrempfehlungen sollten nicht zu oft ausgegeben und korrigiert werden.
- Akustische Empfehlungen werden sehr unterschiedlich beurteilt.
- Dynamische Empfehlungen haben eine etwas höhere Ablenkungsgefahr, da mehr Zusatzinformationen zu verarbeiten sind.

Wie in Kapitel 3.2 erläutert, wurden im Rahmen des Testversuchs „Standard“-Anzeigen der involvierten Anbieter verwendet und es hätte den Projektrahmen gesprengt, wenn noch unterschiedliche Anzeige-Ausgestaltungen getestet worden wären. Die Rückmeldungen der Testlokführer geben aber wichtige Hinweise in Bezug auf die „ideale“ Anzeige, die es bei einem Ausrollen des Systems im Rahmen von Workshops mit Lokführern zu vertiefen gilt.

Akzeptanz

Die Testlokführer sind nach Durchführung der Testfahrten positiv gegenüber Fahrempfehlungen eingestellt. Bei den übrigen Lokführern wurde teilweise grosse Skepsis gespürt, die auch mit Erläuterungen und Praxiserfahrungen nicht immer überwunden werden konnte. Verschiedentlich wurde die Angst vor einer Überwachung und längerfristig auch einer Automatisierung des Fahrens geäussert.

Für die Lokführer ist es wichtig, eigene Spielräume zu behalten. Die Akzeptanz variierte beträchtlich zwischen den drei Systemen und hängt wesentlich davon ab, welche Informationen auf welche Art angezeigt werden.

5. Diskussion

5.1. Wirkungen von Fahrempfehlungen

Die im Kapitel 4 ausgewiesenen quantitativen Resultate müssen aus folgenden Gründen mit Vorsicht genossen werden:

- Der Stichproben-Umfang pro Testphase / Fahrempfehlungssystem ist relativ klein. In der Summe wurden jedoch sehr viele Testfahrten durchgeführt, die insgesamt über alle Fahrempfehlungssysteme hinweg – insbesondere bezüglich Energieverbrauch – zu sehr klaren Ergebnissen führten.
- Aufgrund fehlender Detail-Messdaten basierten die Analysen auf den Gesamtenergieverbräuchen (geeigneter wäre eine Analyse der reinen Traktionsenergieverbräuche).
- Wichtige Einflussfaktoren (z.B. Abgangsverspätungen, Verkehrssituation, Witterung) wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse beruhen auf der Annahme, dass diese Einflussfaktoren im Durchschnitt gleichermassen auf Test- und Kontrollfahrten einwirkten.
- Für die Auswertungen wurden alle Fahrten ausgewertet, bei denen mindestens eines der in Doppeltraktion verkehrenden Fahrzeuge mit einem Energiemesssystem ausgerüstet war.[12] Dabei wurde nicht unterschieden, ob sich das Fahrzeug an erster oder zweiter Position befand, da die Traktionsenergie zwischen den beiden Fahrzeugen als ausgeglichen angenommen wurde, was in der Realität nicht immer exakt zutreffen dürfte. Auch wurden einzelne Züge am frühen Morgen und späten Abend, die nur in Einfachtraktion verkehren, nicht separat ausgewertet, da in einfacher Näherung ein ungefähr gleich hoher Fahrwiderstand für Einzel- wie Doppeltraktionen angenommen werden kann. Auch hier ist anzunehmen, dass sich allfällige Verzerrungen gleichermassen auf Test- wie Kontrollfahrten ausgewirkt hätten.
- Die Testfahrten wurden mit acht gut instruierten Testlokführern durchgeführt, die bei den Testfahrten auf eine möglichst konsequente Umsetzung der Fahrempfehlungen achteten. Dies muss bei der Interpretation der Resultate beachtet werden.

Trotz dieser Limitationen können gemäss Ansicht des Projektteams klare und unbestrittene Erkenntnisse aus dem Pilotprojekt gewonnen werden:

- Im S-Bahn-Verkehr können durch Fahrempfehlungen – bei konsequenter Umsetzung durch das Lokpersonal – Einsparungen beim Gesamt-Nettoenergieverbrauch von rund 10-15% erwartet werden. Die Höhe des Einsparpotenzials hängt dabei wesentlich von den Streckeneigenschaften und vom Fahrplan ab.
- Unterschiede zwischen den theoretischen Fahrprofilen ergeben sich hauptsächlich aus der verwendeten Fahrstrategie (z.B. mit oder ohne Ausrollen) und Fahrzeugmodellierung (z.B. Tunnelwiderstand).
- Die effektive Wirkung der Fahrempfehlungen in der Praxis hängt jedoch nicht in erster Linie vom modellierten Fahrprofil ab, sondern hauptsächlich davon, welche Informationen angezeigt und wie sie durch die Lokführer umgesetzt werden.
- Wichtig ist, dass die Empfehlungen vorausschauend sind. Zudem erscheint es sinnvoll, nicht zu oft und nicht zu viele Empfehlungen auszugeben. Dadurch wird die Akzeptanz und Umsetzbarkeit und damit auch die Wirkung in der Praxis erhöht.
- Fahrempfehlungen helfen, die Streuung der Fahrweisen zu reduzieren.
- Die dynamischen Systeme schneiden bezüglich Pünktlichkeit und Streuung der Fahrweise etwas besser ab, da die Lokführer bei statischen Fahrempfehlungen nur bei Fixpunkten und Haltestellen einen exakten Zeitvergleich machen können.

5.2. Weitere wichtige Erkenntnisse

Signifikante Energieeinsparungen sind nur erreichbar, wenn Flexibilität im betrieblichen Fahrplan zugelassen ist und genützt wird, d.h. wenn nicht jeder Betriebspunkt einen Fixpunkt darstellt. Die Zeiten der Fixpunkte sollten zudem so gelegt sein, dass Spielräume für energiesparendes Fahren möglich sind. Dieses Kriterium stellt den Fahrplan und seine Modellierung vor eine neue Herausforderung.

Es sollte also sichergestellt sein, dass die Fahrprofile in die Fahrplanplanung eingebettet sind und ihre Konfliktfreiheit mit den Fahrprofilen der anderen Züge garantiert werden kann. Eine mögliche Erweiterung – im Vergleich zum Pilotbetrieb – bestünde zudem darin, dass ein Fahrempfehlungssystem auch auf Abweichungen im Betrieb reagieren kann, indem es laufend die relevanten Leitplanken (aktuali-

[12] Die RABe 525 NINA Triebzüge werden mit Energiemesssystemen ausgerüstet – bisher ist der Einbau bei rund der Hälfte der Fahrzeuge erfolgt.

sierte betriebliche Fahrplanzeiten oder -zeitfenster für kritische Betriebspunkte) vom Betriebsleitsystem erhält, in deren Rahmen die Fahroptimierung stattfinden darf.

Zudem ist durch das Pilotprojekt allen Beteiligten bewusst geworden, dass die Verfügbarkeit und Qualität der Daten eine Schlüsselrolle spielt. Dies betrifft sowohl Fahrplandaten, Streckendaten (Topologie und Fahrstrassen-spezifische Geschwindigkeiten) wie auch Rollmaterial-Daten (z.B. Rollwiderstand). Das Pilotprojekt hat gezeigt, dass aus Energie-Sicht bereits wenige Sekunden relevant sein können – will man möglichst das gesamte Einsparpotenzial ohne Gefährdung der Pünktlichkeit ausschöpfen, so ist man zwingend auf korrekte und detaillierte Grundlagendaten angewiesen. Detaildaten, die heute in der Schweiz nicht alle einfach per Knopfdruck zur Verfügung stehen.

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

6.1. Schlussfolgerungen

Aus Sicht des Projektteams können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1) Im S-Bahn-Verkehr können durch Fahrempfehlungen Energieeinsparungen beim Gesamtverbrauch von bis zu 10-15 Prozent erwartet werden.
2) Einsparungen in dieser Höhe sind nur möglich, wenn die Flexibilitäten zwischen den Fixpunkten des betrieblichen Fahrplans voll genutzt werden.
3) Fahrempfehlungen tragen dazu, die Streuung der Fahrweisen zu reduzieren.
4) Fahrempfehlungen können eine hohe Pünktlichkeit gewährleisten. Das Pilotprojekt zeigte, dass dabei die Datenqualität und –verfügbarkeit eine wichtige Rolle spielt und bei der Verteilung der Zeitreserven behutsam vorgegangen werden muss.
5) Auch mit statischen Fahrempfehlungen können hohe Energieeinsparungen erzielt werden. In diesem Fall ist die Beobachtung der Pünktlichkeitsentwicklung speziell wichtig, da die Lokführer den Zeitabgleich jeweils „manuell“ machen müssen.
6) Die Wirkung eines Fahrempfehlungssystems in der Praxis hängt weniger von der Güte der Fahrprofil-Modellierung ab, als vielmehr von der Art und Weise, wie die Informationen und Empfehlungen angezeigt und letztendlich vom Lokpersonal umgesetzt werden.
7) Die Art der Empfehlungen, die Systemparametrisierung (wie oft werden Fahrempfehlungen neu berechnet und neu ausgegeben) und die Gestaltung der Anzeige haben einen grossen Einfluss auf die Akzeptanz beim Lokpersonal und damit auch den Umsetzungsgrad der Fahrempfehlungen.
8) Bei der Einführung von Fahrempfehlungen muss darauf geachtet werden, dass keine gefährlichen Widersprüche zwischen den Empfehlungen und geschlossenen (Vor-)Signalen auftreten. D.h. die Fahrempfehlungen sollten mit ADL bzw. RCS verknüpft werden.
9) Insgesamt bestätigte das Pilotprojekt klar, dass ein Fahrempfehlungssystem ins Gesamtsystem eingebettet werden muss und in enger Abstimmung aller involvierten Akteure (EVU, Fahrplanplanung und Infrastruktur Betrieb) erfolgen sollte.

6.2. Empfehlungen

Das Projektteam empfiehlt basierend auf den Ergebnissen aus dem Pilotprojekt, das Thema Fahrempfehlungen weiter voran zu treiben:

- In einem nächsten Schritt scheint es sinnvoll, Fahrempfehlungen auf verschiedenen Linien, die dieselbe Strecke befahren, einzuführen. Damit können Erkenntnisse gewonnen werden, inwiefern die Fahrempfehlungen Auswirkungen auf die Interaktion verschiedener Züge auf derselben Strecke haben. Erweist sich dieser Schritt als erfolgreich, können die Fahrempfehlungen flächendeckend eingeführt werden.
- Im Rahmen der weiteren Arbeiten müssen die im Rahmen des Pilotprojekts noch zumeist manuell erfolgenden Prozesse zur Streckendatenaufbereitung, Bestimmung der betrieblichen Fixpunkte sowie Modellierung der Fahrprofile (teil-)automatisiert werden. Dies ist notwendig, um Fahrempfehlungen flächendeckend ausrollen und sie im Falle von Änderungen (z.B. Langsamfahrstellen) auch rasch anpassen zu können.
- Die Ergebnisse aus dem Pilotprojekt zeigen, dass Fahrempfehlungen nicht zwingend dynamisch ausgestaltet sein müssen. Unbestritten ist jedoch, dass Fahrempfehlungen bei einer breiteren Umsetzung zwingend in die Anzeige des Lokführer-Tablets zu integrieren sind. Zudem erscheint es zur Sicherung der Pünktlichkeit sinnvoll, das Lokpersonal „dynamisch“ über die jeweils aktuelle Zeitlage (Frühzeitigkeit / Verspätung) zu informieren.
- Die Einführung von Fahrempfehlungen muss in enger Abstimmung mit dem Lokpersonal erfolgen, damit die Umsetzbarkeit und Akzeptanz gewährleistet werden können. Es wird deshalb empfohlen, die Ausgestaltung und Anzeige der Fahrempfehlung direkt mit Lokführern zusammen zu entwickeln.

6.3. Abstimmung mit weiteren Projekten

Gegenwärtig führt die SBB eine Studie durch, die sich sehr ähnlichen Fragestellungen widmet. Unter Einbezug von Lokführern (Personenverkehr und Cargo), Fahrplanplaner, Disponenten und IT-Vertretern wird untersucht, wie die Fahrweise (energie-)optimiert werden kann und welche Informationen die jeweiligen Akteure dafür benötigen.

Die Erkenntnisse des vorliegenden Pilotprojekts der BLS flossen direkt in diese Studie ein und bildeten eine wertvolle Diskussionsbasis dafür. Im Gegenzug wird die BLS über die Ergebnisse der Studie informiert und das weitere Vorgehen wird eng miteinander abgestimmt.

Teilthemen, die auch für das Branchen-Digitalisierungs-Projekts Smartrail 4.0 von Interesse sind, sollen wenn möglich im Rahmen dieses Branchen-Projekts umgesetzt werden (z.B. Bereinigung von Streckendaten, Bereitstellung von betrieblichen Fixpunkten und evtl. auch optimierten Fahrprofilen).

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

ADL	Adaptive Lenkung (System zur Verhinderung von Konflikten zwischen Zügen)
ADL eco	Adaptive Lenkung für energiesparendes Fahren
BDF	Burgdorf
BN	Bern
BP	Belp
DAS	Driver Advisory System (Fahrempfehlungssystem)
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
RCS	Rail Control System
SBB-I	Schweizerische Bundesbahnen Infrastruktur
TH	Thun
TTG	Transportation Technology (australische Firma)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strecke S44 12
Abbildung 2: RABe 525 NINA 12
Abbildung 3: Strecke S3 12
Abbildung 4: RABe 515 Mutz 12
Abbildung 5: Papier-Fahrordnung 13
Abbildung 6: Papier-Fahrordnung 13
Abbildung 7: Energymiser-Display (TTG) 14
Abbildung 8: Display von GreenSpeed (Cubris) 15
Abbildung 9: Phasen des Pilotprojekts 15
Abbildung 10: Zeit-Weg-Liniengrafik als Basis für die Identifizierung der betrieblichen Fixpunkte 16
Abbildung 11: Energieverbräuche für Test- und Kontrollgruppen, S44, Fahrtrichtung Burgdorf-Thun (anonymisiert) 18
Abbildung 12: Energieverbräuche für Test- und Kontrollgruppen, S44, Fahrtrichtung Thun-Burgdorf (anonymisiert) 18
Abbildung 13: Ankunftsverspätungen je Fixpunkt, S44, Fahrtrichtung Burgdorf-Thun (anonymisiert) . 19
Abbildung 14: Ankunftsverspätungen je Fixpunkt, S44, Fahrtrichtung Thun-Burgdorf (anonymisiert) . 20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die getesteten Systeme 13
Tabelle 2: Simulierte Traktionsenergieverbräuche für die S44 je Fahrprofil (anonymisiert) 17

Literaturverzeichnis

- Studer T., Graffagnino T., Schäfer R.: Fahrempfehlungen im S-Bahn-Betrieb: Pünktlich und energiesparend am Ziel, ETR SWISS, 2017, Nr. 10/2017, S. 75-80.