



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)

Energiekonzept Appenzeller Bahnen.

Beitrag zur Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr.

Schlussbericht

Dr. Steffen Schranil, Schweizerische Bundesbahnen

Industriestrasse 1 – 3052 Zollikofen, steffen.schranil@sbb.ch, www.sbb.ch, +41 79 172 39 68

ab 01.07.2017: Riggerbachstr. 6 – 4600 Olten, steffen.schranil@sbbcargoint.com, +41 79 172 39 68

Roland Steingruber, Appenzeller Bahnen

St. Gallerstrasse 53 – 9101 Herisau, roland.steingruber@appenzellerbahnen.ch,

www.appenzellerbahnen.ch, +41 354 50 67

Impressum

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

Programmverantwortung
Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 088
Bezugsquelle: Kostenlos zu beziehen über das Internet
www.bav.admin.ch/energie2050

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

Bern, den 29.06.2017

Inhalt

Executive Summary (Deutsch).....	2
Executive Summary (Französisch).....	3
Executive Summary (Englisch)	3
Zusammenfassung (Deutsch)	4
Résumé (Französisch)	7
1. Ausgangslage	10
2. Ziel der Arbeit.....	12
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand	13
4. Ergebnisse	15
4.1 Analyse und Quantifizierung der Energieflüsse.....	15
4.2 Identifikation wichtiger Einflussfaktoren auf den Energiebedarf	21
4.3 Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz	24
4.3.1 Angebot.....	24
4.3.2 Technik Traktion	32
4.3.3 Technik stationär.....	33
4.3.4 Bahnproduktion	37
5. Diskussion.....	40
6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	42
Literaturverzeichnis	43

Executive Summary (Deutsch)

Die Analyse der Energieflüsse der Appenzeller Bahnen nebst der Identifikation der zugehörigen Einflussgrössen und Ableitung möglicher Energieeffizienzmassnahmen folgt einem fundierten systemtheoretischen Ansatz zur energetischen Analyse elektrischer Bahnsysteme. Das Energiekonzept Appenzeller Bahnen folgt darüber hinaus dem Ansatz „grosse Bahn“ hilft „kleiner Bahn“ bei der Entwicklung energieeffizienter Mobilität auf Basis von Bahnknowhow innerhalb der Bahnen. Die Dreiteiligkeit aus der Analyse und Quantifizierung der Energieflüsse, der Identifikation wichtiger Einflussfaktoren auf den Energiebedarf und der Ableitung geeigneter Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz ist geeignet, das System elektrische Bahn – konkret die Appenzeller Bahnen – nach Potenzialen der Energieeffizienz systematisch zu analysieren. Die sechs priorisierten von insgesamt 14 Massnahmen sind aus den systematischen Analysen der Appenzeller Bahnen abgeleitet. Sie erschliessen einen wesentlichen Teil des aufgezeigten Energieeinsparpotenzials und bewirken jährlich wiederkehrend sinkende Energiekosten.

Executive Summary (Französisch)

L'analyse des flux énergétiques des Appenzeller Bahnen, associée à l'identification des grandeurs d'influence y relatives et à la déduction des mesures possibles d'amélioration de l'efficacité énergétique, suit une approche théorique fondée concernant l'analyse énergétique des systèmes ferroviaires électriques. Le concept énergétique des Appenzeller Bahnen applique en outre le principe que le «grand chemin de fer» aide le «petit chemin de fer» à développer la mobilité énergétiquement efficace sur la base du savoir-faire des entreprises ferroviaires. La répartition en trois ressortant de l'analyse et de la quantification des flux énergétiques, l'identification des facteurs d'influence importants pour le besoin énergétique et la déduction de mesures appropriées pour l'augmentation de l'efficacité énergétique convient pour analyser le système du chemin de fer électrique – concrètement les Appenzeller Bahnen – pour y déceler systématiquement les potentiels d'amélioration de l'efficacité énergétique. Les six mesures définies parmi 14 comme prioritaires sont déduites des analyses systématiques des Appenzeller Bahnen. Elles couvrent une partie importante du potentiel identifié pour l'économie d'énergie et permettent de baisser les coûts énergétiques annuels.

Executive Summary (Englisch)

Analysing Appenzeller Bahnen's energy flows, identifying the corresponding influencing factors and deriving possible energy efficiency measures therefrom follows a sound model from system theory for analysing energy aspects of electric railway systems. Appenzeller Bahnen's energy policy is also based on a "large rail company" helps "small rail company" approach when it comes to developing energy-efficient mobility based on railway expertise within the railway companies. The three-step process of analysing and quantifying energy flows, identifying important factors influencing energy requirements and deriving suitable measures to increase energy efficiency is a good way to systematically analyse an electric railway system – specifically Appenzeller Bahnen – in terms of energy efficiency potential. The six measures prioritised from a total of 14 have been determined based on systematic analyses of Appenzeller Bahnen. They tap into most of the energy-saving potential identified and cause energy costs to drop year after year.

Zusammenfassung (Deutsch)

Die Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Verkehr ist eine anspruchsvolle und wichtige Aufgabe auf dem Weg zu nachhaltiger Mobilität. Dies gilt analog für Elektrische Bahnsysteme, welche systembedingt neben ihrer hohen technischen wie betrieblichen Leistungsfähigkeit bereits eine hohe Energieeffizienz mitbringen. Unterstützt vom Bundesamt für Verkehr (BAV) haben sich SBB Energie und Appenzeller Bahnen (AB) diesem Thema gewidmet. Der Ansatz „grosse Bahn“ hilft „kleiner Bahn“ war Auslöser des nun vorliegenden Energiekonzepts.

Das Energiekonzept AB untersucht das elektrische Bahnsystem der Appenzeller Bahnen auf ressourcenbasierter Grundlage (Abbildung 1). Dieser methodische Ansatz stellt sicher, dass die Steigerung der Energieeffizienz als Systemoptimierung adäquat abgebildet wird. Hierfür werden Traktionsbedarf und stationärer Energiebedarf gleichermaßen in die Analysen einbezogen.

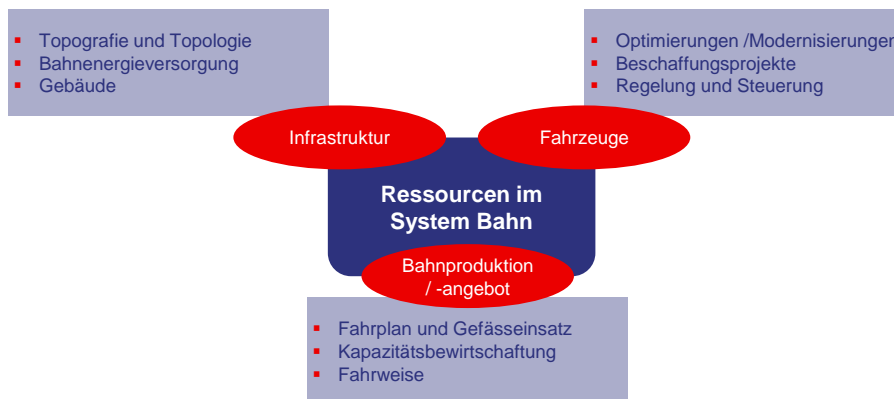


Abbildung 1: Ressourcen im System Bahn mit Einfluss auf die Energieeffizienz

Der Frage einer systematischen Analyse im Sinne zu steigender Energieeffizienz wird mit drei aufeinander aufbauenden Teilzielen nachgegangen. Diese setzen sich wie folgt zusammen:

- Analyse und Quantifizierung der Energieflüsse
- Identifikation wichtiger Einflussfaktoren auf den Energiebedarf
- Aufzeigen und Empfehlen von Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz

Jährlich setzen die Appenzeller Bahnen rund 15 GWh Energie um. Diese Energiemenge stammt aus acht Energieträgern und bedient 15 Energiebedarfsgruppen. Abbildung 2 illustriert den mittleren Gesamtenergieanteil dieser Energiebedarfsgruppen für den Betrachtungszeitraum.

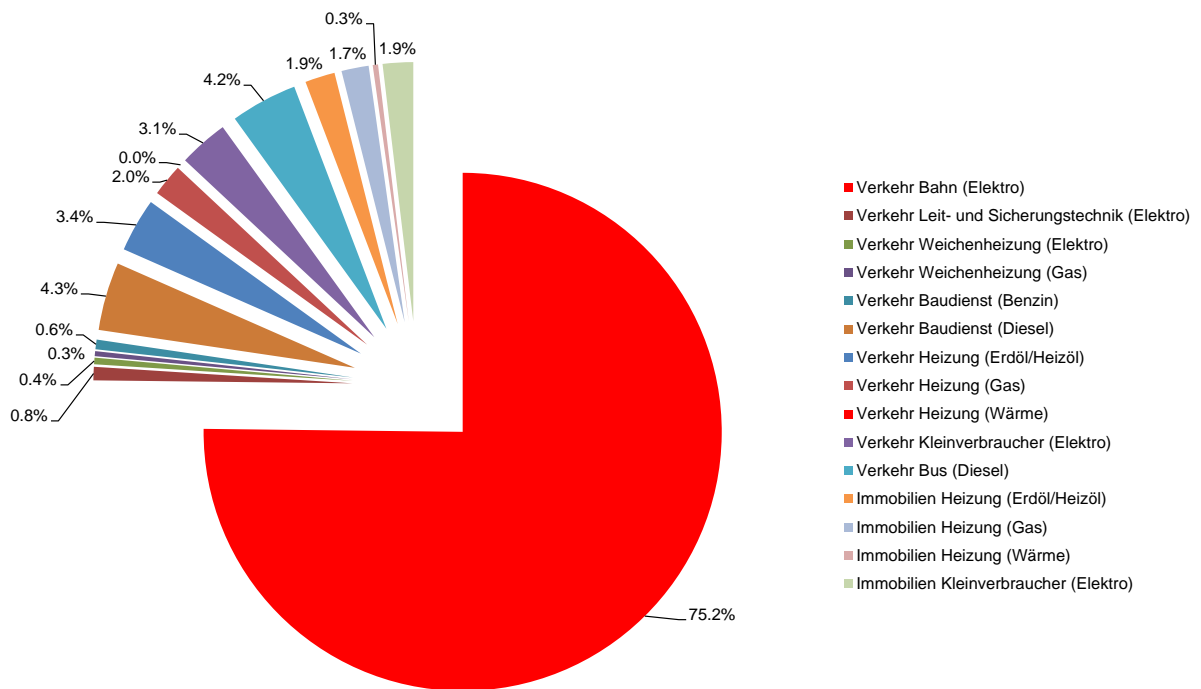


Abbildung 2: Mittlerer Anteil der Energiebedarfsgruppen der Appenzeller Bahnen 2014/2015

Die Einflussfaktoren auf den Energiebedarf sind transparent aufzuzeigen, wenn die Energieeffizienz eines elektrischen Bahnsystems weiter gesteigert werden soll. Hierfür liefern die langfristigen Planungen in Form des Angebots, deren technische Realisierung in Form von Fahrzeugen und Infrastruktur sowie die Bahnproduktion in Form des operativen Geschäfts relevante Ansatzpunkte (Abbildung 3). Der Gesamtenergiebedarf wird somit systematisch nachzeichnenbar.

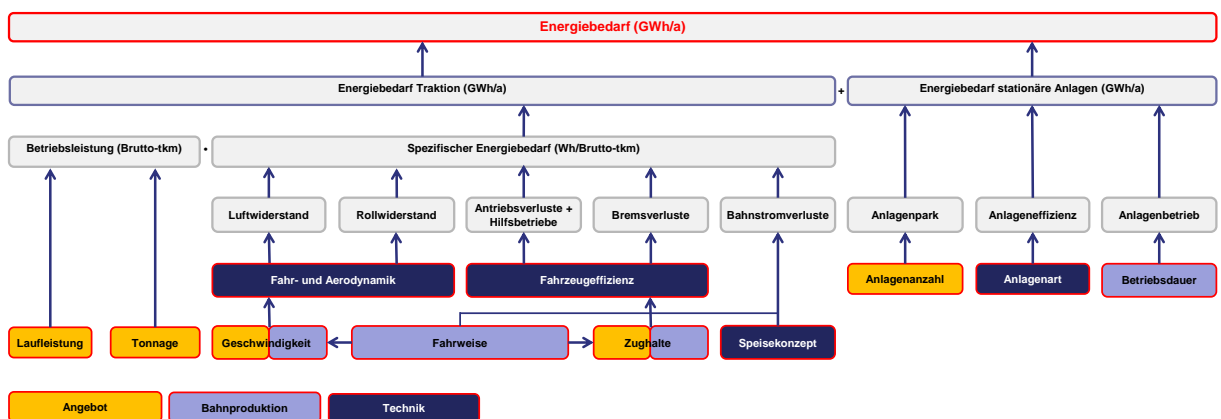


Abbildung 3: Einflussfaktoren auf den Gesamtenergiebedarf

Auf Basis der Einflussfaktoren des gesamten Energiebedarfs wird eine methodisch saubere Ableitung von Energieeffizienzmassnahmen möglich. Hierzu sind alle Unternehmensbereiche zu betrachten, wobei ein besonderer Fokus auf die grössten Energiebedarfsgruppen im Kerngeschäft der Appenzeller Bahnen gelegt wurde. Tabelle 1 gibt einen Überblick über das Massnahmenportfolio nebst der jährlichen Energieeinsparung bei Umsetzung dieser Aspekte. Von den insgesamt 14 Massnahmen werden sechs Massnahmen für die bevorzugte Umsetzung vorgeschlagen. Für zwei dieser Massnahmen bestehen bereits konkretere Umsetzungspläne.

Ressource	System	Massnahmenart	Massnahmenbeispiel	Energie (kWh/a)
Angebot	Liniennetz	Taktanpassung ausserhalb HVZ	FW-Verstärker (18:58 / 19:22) mit Fluchtfahrten	15500
		Geschwindigkeitsprofile	Anpassung Geschwindigkeitsprofile	Glättung Geschwindigkeitsprofile
	Anpassung Fahr- und Reservezeitverteilung		Fahrzeitverteilung vor Kreuzungen und Endpunkten	191900
	Ausdehnung von Halt auf Verlangen		Waldstatt, Weissbad // Teufen, Bühler	15200
	Transportgefässeinsatz	Anpassung Transportgefässeinsatz NVZ	Module gemäss Flottenkonzept	563800
Technik Traktion	Traktionsbedarf	IGBT-Fahrzeuge mit Antriebsoptimierung	Neufahrzeuge GAW (5) und DML (11)	372000
	Hilfsbetriebe	bedarfsabhängige Hilfsbetriebesteuerung		
	Komfortbetriebe	Abstimmung, energieoptimierte Komfortbetriebe		
Technik stationär	Bahnenenergieversorgung	Speisekonzept	nachregulierbare rückspeisefähige Gleichrichter	506000
		Spannungserhöhung	Anpassung TB auf 1.5 kV	62000
	Weichenheizung	Optimierung Weichenheizungsbetrieb	automatische Weichenheizung	243000
		Gebäudeheizung	energetische Gebäudesanierung	-
Bahnproduktion	Fahrweise (Operation)	Lf-Schulung	jährliche Lokführerschulung mit Energieeffizienzmodul	248000
	Dispositionssystem	Fahrempfehlungssystem	DAS auf Basis Betriebslageinformation	372000
				2781300

Tabelle 1: Massnahmenportfolio im Energiekonzept AB

Die Appenzeller Bahnen stehen aktuell vor der grössten Modernisierung ihrer Geschichte. Die Durchmesserlinie St. Gallen und das neue Rollmaterial sind hierbei zwei zentrale Aspekte. Energieeffizienz ist heute und zukünftig zentraler Erfolgsfaktor für Bahnsysteme. Dies folgt aus ökologischen und ökonomischen Motiven: Über reduzierte Energiekosten zahlt sich eine gesteigerte Energieeffizienz doppelt aus. Elektromobilität hat im elektrischen Bahnsystem somit eine lange Geschichte und eine grossartige Zukunft. Dank des vorliegenden Energiekonzepts bleibt Energieeffizienz ein zentraler Wegbegleiter bei der Ausgestaltung nachhaltiger Mobilität bei den Appenzeller Bahnen.

Résumé (Französisch)

L'augmentation de l'efficacité énergétique dans les transports publics constitue une tâche importante et exigeante sur le chemin de la mobilité durable. Cela s'applique aussi aux systèmes ferroviaires électriques même si, de par leur nature, ils présentent déjà une grande efficacité énergétique en plus de leur performance élevée tant sur le plan technique qu'au niveau de l'exploitation. Avec l'assistance de l'office fédéral des transports (OFT), CFF Énergie et les Appenzeller Bahnen (AB) se sont penchés sur ce sujet. L'approche voulant que le «grand chemin de fer» aide le «petit chemin de fer» a été le déclencheur du concept d'énergie présenté maintenant.

Le concept énergétique des Appenzeller Bahnen analyse le système électrique de cette entreprise sur une base fondée sur les ressources (Figure 4). Cette approche méthodologique garantit que l'amélioration de l'efficacité énergétique est représentée de manière adéquate comme optimisation du système. Pour cela, les besoins de la traction et les besoins énergétiques stationnaires sont analysés dans une même mesure.

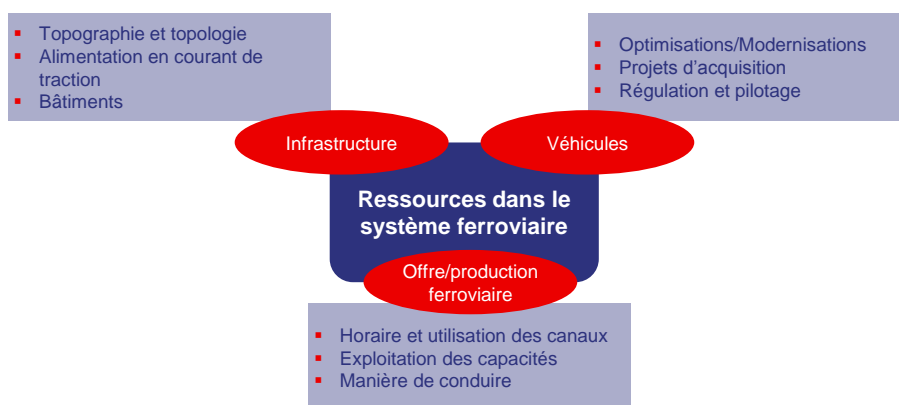


Figure 4: ressources du système ferroviaire avec leur influence sur l'efficacité énergétique

La question d'une analyse systématique pour améliorer l'efficacité énergétique est abordée avec trois objectifs partiels reposant les uns sur les autres. Ceux-ci sont constitués des éléments suivants:

- analyse et quantification des flux énergétiques
- identification des facteurs d'influence importants sur les besoins énergétiques
- présentation et recommandation de mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique

Les Appenzeller Bahnen consomment chaque année quelque 15 GWh d'énergie. Cette énergie provient de huit agents énergétiques et est utilisée dans 15 groupes de besoins. Figure 5 illustre la part moyenne de l'énergie de chaque groupe de besoins pour la période sous observation.

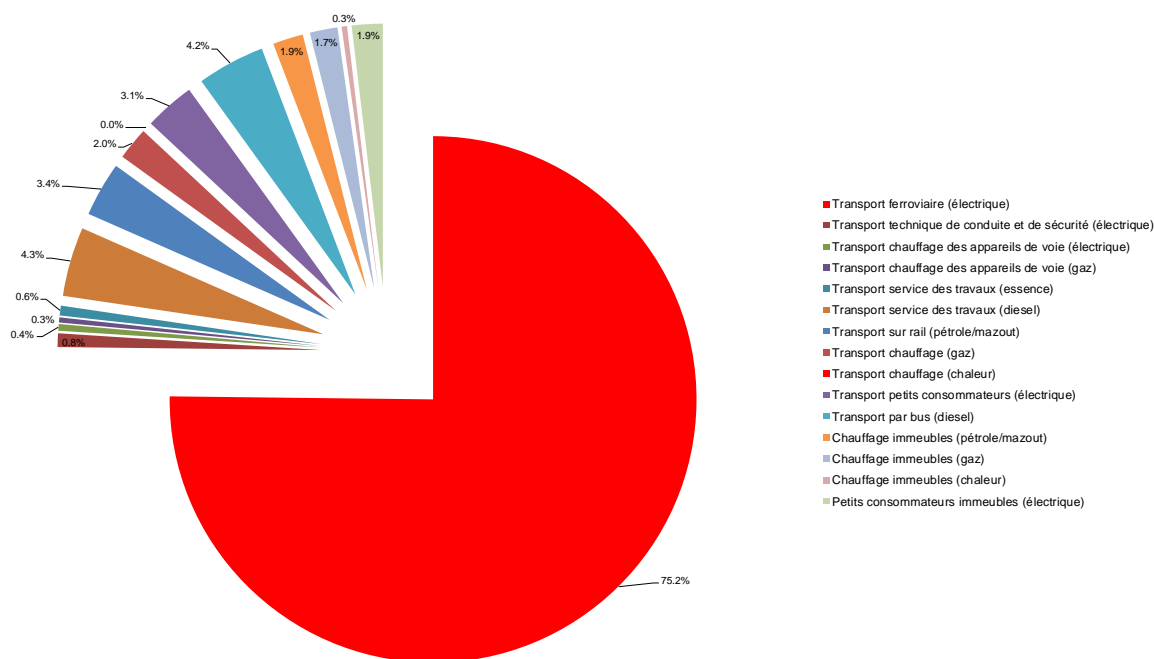


Figure 5: part moyenne des groupes de besoins énergétique des Appenzeller Bahnen 2014/2015

Les facteurs d'influence sur les besoins énergétiques doivent être présentés de manière transparente si l'on veut que l'efficacité énergétique d'un système ferroviaire électrique continue de s'améliorer. Des pistes intéressantes pour cela sont fournies par les planifications à long terme, sous la forme de l'offre, de sa réalisation technique en termes de matériel roulant et d'infrastructure ainsi que par la production ferroviaire sous la forme de son activité opérationnelle (Figure 6). Les besoins totaux en énergie peuvent ainsi être présentés systématiquement.

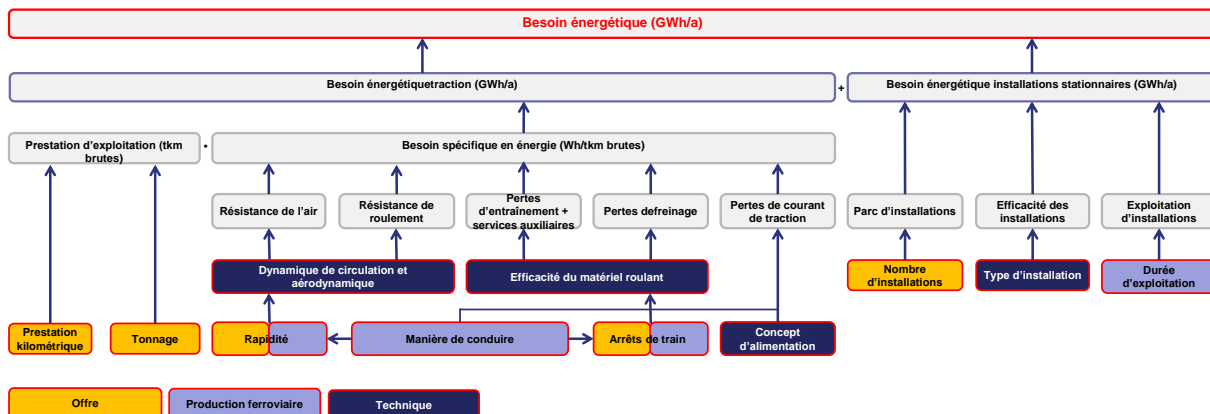


Figure 6: facteurs d'influence sur les besoins énergétiques totaux

La connaissance des facteurs d'influence sur les besoins énergétiques totaux permet de déduire méthodiquement des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique. Pour cela, il y a lieu de

considérer tous les domaines de l'entreprise, tout en mettant un accent particulier sur les plus grands groupes de besoins énergétiques dans le cœur de métier des Appenzeller Bahnen. Tableau 2 donne un aperçu du portefeuille de mesures à côté de l'économie annuelle en énergie si ces aspects sont mis en œuvre. Parmi les 14 mesures au total, six sont proposées pour une mise en œuvre prioritaire. Les plans de réalisation concrets existent déjà pour deux de ces mesures.

Ressource	System	Genre de mesure	Exemple de mesure	Énergie (kWh/a)
Offre	Réseau des lignes	Adaptation de la cadence en dehors des heures de pointe	Amplificateur FW (18:58 / 19:22) avec courses d'évacuation	15500
	Profils de vitesse	Adaptation des profils de vitesse	Lissage des profils de vitesse	191900
		Adaptation de la répartition du temps de réserve et de marche	Répartition du temps de marche avant croisements et points terminaux	191900
	Utilisation des canaux de transport	Extension des arrêts sur demande	Waldstatt, Weissbad // Teufen, Bühler	15200
Adaptation de l'utilisation des canaux de transport pendant les heures marginales		Modules selon le concept du parc de véhicules	563800	
Technique de traction	Besoin de traction	Véhicules à IGBT avec optimisation de l'entraînement	Nouveaux véhicules GAW (5) et DML (11)	372000
	Services auxiliaires	Commande des services auxiliaires en fonction des besoins		
	Services de confort	Arrêt ou optimisation énergétique des services de confort		
Technique stationnaire	Alimentation en courant de traction	Concept d'alimentation	Réglage complémentaire des redresseurs à même de restituer l'énergie	506000
		Augmentation du voltage	Adaption TB à 1.5 kV	62000
	Chauffage des appareils de voie	Optimisation du fonctionnement du chauffage des appareils de voie	Chauffage automatique des appareils de voie	243000
		Chauffage des bâtiments	Assainissement énergétique des bâtiments	-
Production ferroviaire	Manière de conduire (Operation)	Formation des mécaniciens de locomotive	Formation annuelle des mécaniciens avec module d'efficacité énergétique	248000
	Système de disposition	Système de recommandation pour la conduite	Cela sur la base des informations sur la situation de l'exploitation	372000
				2781300

Tableau 2: portefeuille de mesures dans le concept énergétique des Appenzeller Bahnen

Les Appenzeller Bahnen sont actuellement à la porte de la plus grande modernisation de leur histoire. La ligne diamétrale de St-Gall et le nouveau matériel roulant en constituent deux aspects centraux. L'efficacité énergétique est, aujourd'hui comme demain, le facteur de succès central des systèmes ferroviaires. Cela pour des raisons écologiques et économiques: une meilleure efficacité énergétique est doublement rentable car elle fait aussi baisser les frais énergétiques. La mobilité électrique a donc une longue histoire et un grandiose avenir dans le système ferroviaire électrique. Grâce au présent concept énergétique, l'efficacité énergétique reste un facteur central accompagnant la conception de la mobilité durable aux Appenzeller Bahnen.

1. Ausgangslage

Elektrische Bahnen sind leistungsfähige Verkehrssysteme mit einer 1879 beginnenden Historie energieeffizienter Elektromobilität. Die weitere Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Verkehr ist erklärtes Ziel der „Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr“ (ESöV 2050) des Bundesamts für Verkehr. Es unterstützt Verkehrsunternehmen bei der konzeptionellen Ausgestaltung energieeffizienter Mobilität. In diesem Kontext spannen Schweizerischen Bundesbahnen SBB und Appenzeller Bahnen AB im Sinne eines partnerschaftlichen Knowhowaustauschs zusammen und erarbeiten das vorliegende „Energiekonzept Appenzeller Bahnen“. Energieeffizienz gilt hierbei als gemeinsamer strategischer Vorteil der elektrischen Bahnen, unabhängig von ihrer konkreten technischen wie betrieblichen Ausstattung.

Der elektrische Bahnbetrieb bietet eine Reihe von Vorteilen. Er gilt inzwischen als etablierte, verfügbare und sichere Technologie zur Bewältigung grosser Verkehrsmengen. Zur Erfüllung der Verkehrsaufgabe steht eine hohe installierbare Leistung bei gleichzeitig hoher Leistungsdichte zur Verfügung. Daraus resultieren hohe Beschleunigungswerte, die aufgrund der geringen Rad-Schiene-Reibung bei tiefem Verschleiss realisierbar sind. Vor allem in bebauten und anderen sensiblen Gebieten zahlt sich die lokale Emissionsfreiheit aus. Gleichzeitig ermöglicht sie – je nach gewählter und verfügbarer Primärenergie zur Bereitstellung der Elektroenergie – eine nachhaltige Transformation der Mobilitätsbedürfnisse in Personen- und Güterverkehr. Dies äussert sich wiederum in einem niedrigen spezifischen Energiebedarf, auch durch die Rekuperation von Bremsenergie. Elektrische Bahnsysteme fallen insgesamt durch geringe variable Kosten und vergleichsweise geringe Betriebskosten auf, wenngleich die Fixkosten gegenüber anderen weniger leistungsfähigen Verkehrssystemen höher ausfallen. Insofern generiert die intensive Nutzung elektrischer Bahnsysteme aus ökonomischer und ökologischer Perspektive einen Mehrwert.

Die SBB haben sich im Rahmen der Vorbildfunktion bundesnaher Betriebe im Energiebereich vorgenommen, den Energiebedarf bis 2025 um 20 % gegenüber der Prognose aus 2012 zu reduzieren. Über alle Energieträger und –bedarfsgruppen hinweg ergibt dies eine einzusparende Energiemenge von jährlich 600 GWh. Dieses ambitionierte Ziel ist erreichbar, wenn das System elektrische Bahn als Ganzes verstanden, analysiert und optimiert wird. Die Steigerung der Energieeffizienz im komplexen System Bahn führt zwangsläufig auf eine Systemoptimierung. Angefangen bei den planerischen Überlegungen als langfristige Grundlage, über die technischen Parameter bis hin zum operativen Geschäft sind alle Instanzen in puncto Energieeffizienz gefordert. Daher haben die SBB mit dem Top-Programm Energiesparen eine Plattform geschaffen, welche eine Koordination der vielfältigen Energieeffizienzthemen ermöglicht. Mindestens genauso zentral ist jedoch die Bewusstseinsbildung: Die Verankerung der Energieeffizienzthematik über alle Stufen des Unternehmens wird somit kritischer Erfolgsfaktor [7].

Die Appenzeller Bahnen entstanden per 01.01.2006 als Fusion der damaligen Appenzeller Bahnen mit der Trogener Bahn (TB), der Rorschach-Heiden-Bahn (RHB) und der Rheineck-Walzenhausen-Bahn (RhW). Bereits seit 2003 übernehmen die Appenzeller Bahnen die Geschäftsführung der Frauenfeld-Wil-Bahn (FW), welche jedoch nicht integraler Bestandteil des Unternehmens Appenzeller Bahnen ist. Zum 31.12.2015 verfügen die Appenzeller Bahnen über 77 km Strecken, 11 Gleichrichterstationen, 53 Brücken, 4 Tunnel bzw. Galerien, 23 Triebfahrzeuge (darunter 1 Elektrolokomotive), 37 Bahnhöfe und 28 Haltestellen. 188 Mitarbeitende sind für die Appenzeller Bahnen tätig. Die erwähnte Frauenfeld-Wil-Bahn verfügt per 31.12.2015 über 17 km Strecke, 3 Gleichrichterstationen, 4 Brücken, 5 Gelenk- und 2 Triebwagen, 15 Stationen. Im Energiekonzept Appenzeller Bahnen wird an ausgewählten Stellen auf diese Bahn eingegangen; sie ist jedoch nicht integraler Bestandteil der Analysen.



Abbildung 7: AB trifft SBB in Rorschach – Triebwagen 24 als S25 nach Heiden und Re 421 mit EC 196 nach Zürich HB (21.04.2017, Foto: Steffen Schranil)

In der Energiestrategie 2050 des Bundes nimmt die SBB bewusst eine Vorreiterrolle ein. Sie engagiert sich im TOP-Programm Energiesparen in einer Querschnittsfunktion über alle Divisionen und unterstützt die Fachexperten mit spezifischem Knowhow. Diese Erkenntnisse sollen weiteren Transportunternehmungen im öffentlichen Verkehr, hier konkret den Appenzeller Bahnen, zugänglich gemacht werden. Sie werden dazu mit konkreten Analysen, Ansätzen und Massnahmen zur Umsetzung der Energiestrategie 2050 unterstützt. In dieser Zusammenarbeit werden Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz der Appenzeller Bahnen abgeleitet. Der verantwortungsvolle Umgang mit Energie und die Steigerung der Energieeffizienz haben somit einen ökologischen Aspekt und eine klar ökonomische Zielstellung: Energieeffizienzmassnahmen führen zu sinkenden Energiekosten, wirken jährlich wiederkehrend und verbessern das betriebswirtschaftliche Gesamtergebnis nachhaltig.

Das Energiekonzept Appenzeller Bahnen folgt konsequent dem Ansatz „grosse Bahn“ hilft „kleiner Bahn“ bei der Entwicklung energieeffizienter Mobilität auf Basis von Bahnknowhow innerhalb beider Bahnen.

2. Ziel der Arbeit

Das Energiekonzept Appenzeller Bahnen führt auf eine energetische Systemoptimierung. Es verfolgt hierzu drei spezifische aufeinander aufbauende Ziele:

- Analyse und Quantifizierung der Energieflüsse
- Identifikation wichtiger Einflussfaktoren auf den Energiebedarf
- Aufzeigen und Empfehlen von Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz

Die Analyse und Quantifizierung der Energieflüsse soll aufzeigen, wie viel Energie aus welchen Energieträgern für welche Energiebedarfsgruppen eingesetzt wird. Dies ermöglicht eine Übersicht über die Energieflüsse im Unternehmen Appenzeller Bahnen. Gleichzeitig führt diese Analyse zur Wichtung der Relevanz einzelner Energiesenken im Hinblick auf die Gesamtmenge. Aus den Energieflüssen wird der Energiebedarf nachzeichnenbar. Im zweiten Projektziel werden darauf aufbauend relevante Einflussfaktoren auf den Energiebedarf eruiert. Neben der Morphologie des summarischen Energiebedarfs dient dies der Verortung möglicher Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz im Kontext des Gesamtsystems. Diese Massnahmen orientieren sich an den Ressourcen Infrastruktur, Fahrzeug und Bahnangebot (inklusive Bahnproduktion) des Systems elektrische Bahn (Abbildung 8).

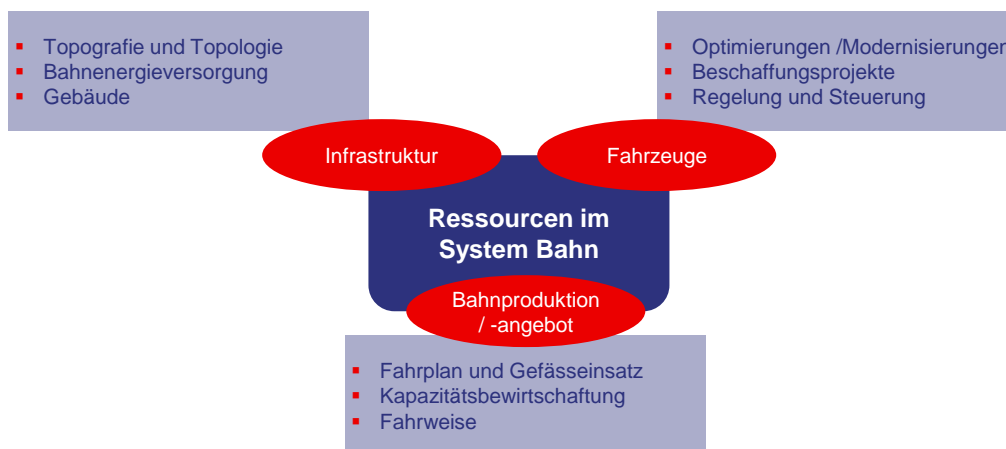


Abbildung 8: Ressourcen im System Bahn mit Einfluss auf die Energieeffizienz

Aufgrund der Verknüpfung von Energiemenge und Energiekosten über den Energiepreis hat jede Energieeffizienzmassnahme neben der ökologischen auch eine ökonomische Komponente.

Es ist erklärtes Ziel dieses Projekts, Massnahmen mit steigender Wirkung auf Energie- und Kosteneffizienz zu evaluieren und zur Umsetzung vorzuschlagen.

3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

In den letzten Jahren wurde der verantwortungsvolle Umgang mit knappen Ressourcen von breiten Kreisen der Öffentlichkeit und der Fachwelt aufgenommen. Das daraus abgeleitete Streben nach Energieeffizienz scheint heute ein breiter gesellschaftlicher Konsens zu sein. Hingegen ist der Weg dahin anspruchsvoll und bisweilen kleinschrittig. Im Gegensatz zur gängigen Fachliteratur kennt die Studienlandschaft erste Ansätze einer systematisierten Energieeffizienzperspektive im System Bahn [12], [2], [4], [7]. Diverse Fachaufsätze nähern sich der energetischen Systemoptimierung im Bahnsystem [8], [9], [10].

Für die erste praktische Umsetzung der Erkenntnisse kommen zunächst meist einzelne Massnahmen in Betracht. Als eine Art Pilotanwendung zeigen sie, was die Steigerung der Energieeffizienz im System Bahn benötigt und bewirkt. Sie dienen als eine Art praktischer Machbarkeitsnachweis. Dieses Vorgehen ist im Sinne der Erreichung realistischer Ziele existenziell und dennoch inkrementell, da es zunächst kleinschrittig und nur in Teilaspekten des komplexen Gesamtsystems Wirkung entfaltet. Um der Systemoptimierung der elektrischen Bahn und somit dem Bahnsystem gerecht zu werden, ist die Einordnung dieser vielversprechenden Massnahmen in die Systemlandschaft jedoch zwingend.



Abbildung 9: AB neben SBB – 1.5 kV-DC-Fahrleitung der Appenzeller Bahnen nahe der 132 kV-AC-Freileitung der Schweizerischen Bundesbahnen in Gossau (04.12.2016, Foto: Steffen Schranil)

Im Energiekonzept Appenzeller Bahnen wird ein dreiteiliger Forschungsansatz aus Energiefluss, Einflussgrössen und Energieeffizienzmassnahmen gewählt. Er kam erstmals im Energiecheckup Cargo [11] zur Anwendung. Die methodisch saubere Ableitung des Massnahmenportfolios zur Steigerung der Energieeffizienz spricht für dieses Konzept, auch wenn der Aufwand zur Quantifizierung aller Energieflüsse aufwändig und von einigen wenigen Unschärfen begleitet ist. Die Klassifizierung der Einflussgrössen wie auch die Gruppierung der Energieeffizienzmassnahmen folgen den Ressourcen

Infrastruktur, Fahrzeug und Bahnangebot / -produktion des Systems Bahn. Zur Vertiefung dieses Konzepts sind geeignete Ansprechpartner bei der Partnerbahn zu benennen. Dies stellt eine kritische Diskussion als elementaren Bestandteil dieses Forschungsansatzes sicher.

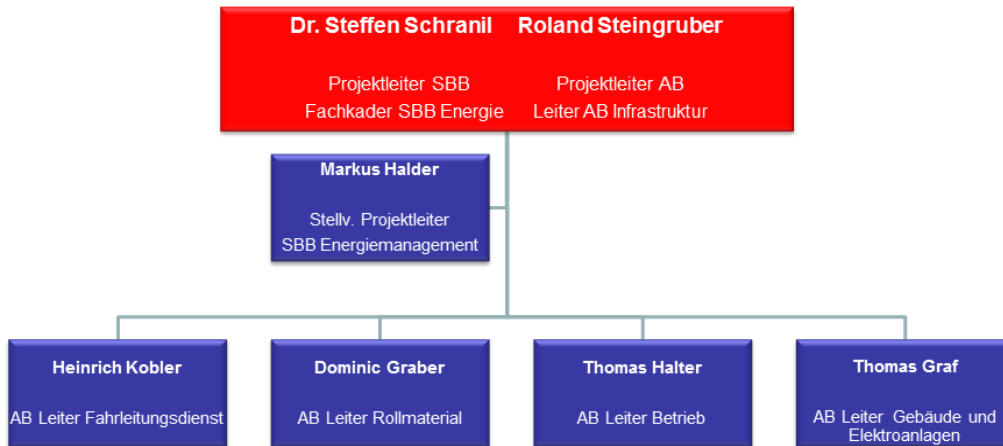


Abbildung 10: Organigramm im Projekt Energiekonzept Appenzeller Bahnen

Das Energiekonzept Appenzeller Bahnen folgt dem beschriebenen dreistufigen Ansatz und ist mit einem entsprechenden Projektorganigramm (Abbildung 10) hinterlegt. Es unterstützt die Appenzeller Bahnen bei der Entwicklung einer nachhaltigen Mobilitätsperspektive.

Die Analyse der Energieflüsse der Appenzeller Bahnen nebst der Identifikation der zugehörigen Einflussgrößen und Ableitung möglicher Energieeffizienzmassnahmen folgt einem systematischen Ansatz zur energetischen Analyse elektrischer Bahnsysteme.

4. Ergebnisse

4.1 Analyse und Quantifizierung der Energieflüsse

Zur Analyse und Quantifizierung der Energieflüsse wurden die Energiedaten der Appenzeller Bahnen für die Jahre 2014 und 2015 zusammengetragen. Der Vergleich beider Jahre dient der Plausibilisierung; Grundlage aller Energiewerte bildeten die abgerechneten Zählerstände. Hierbei waren mit der Betrachtungsgrenze Unternehmen AB acht Energieträger zu berücksichtigen (Tabelle 3).

	2014	2015	mittlerer Anteil
Elektroenergie (Mittelspannung 50 Hz)	10906608	11224615 kWh	73%
Elektroenergie (Mittelspannung 16.7 Hz)	376885	374200 kWh	2%
Elektroenergie (Niederspannung 50 Hz)	918490	977860 kWh	6%
Benzin	95708	87347 kWh	1%
Diesel	1467711	1092891 kWh	8%
Erdöl/Heizöl	1049197	539526 kWh	5%
Gas	497890	725433 kWh	4%
Wärme	47816	53112 kWh	0%
gesamt	15360304	15074983 kWh	100%

Tabelle 3: Energieträger der Appenzeller Bahnen mit mittlerem Anteil 2014/2015

Mit 81 % mittlerem Gesamtanteil dominiert die elektrische Energie hierbei deutlich vor Diesel (8 %), Erdöl/Heizöl (5 %), Erdgas (4 %) sowie Benzin und Fernwärme. Der grösste Anteil der Elektroenergie wird hierbei zur Versorgung der Gleichrichterstationen zur Bereitstellung der Traktionsenergie umgesetzt, wie noch aufgezeigt wird. Abbildung 11 bereitet die Energiemengen grafisch auf.

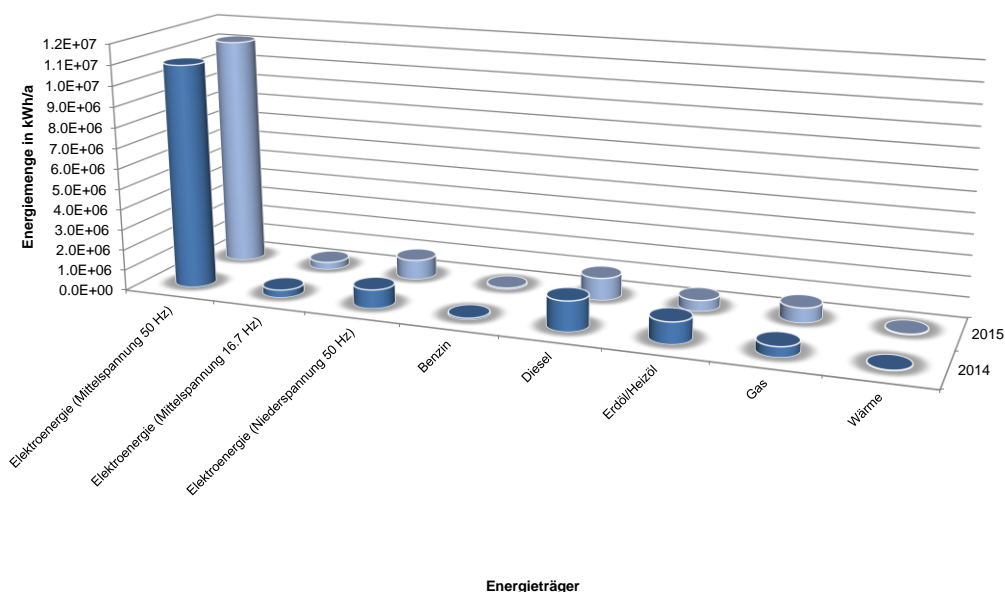


Abbildung 11: Energiebezug der Appenzeller Bahnen nach Energieträgern 2014/2015

Der jährliche Energiebezug der Appenzeller Bahnen umfasst rund 15 GWh. Diese Energiemenge wird in den Geschäftsfeldern Verkehr und Immobilien umgesetzt. Dabei bestehen folgende Energiebedarfsgruppen:

- **Geschäftsfeld Verkehr**
Bahn, Leit- und Sicherungstechnik, Weichenheizung, Unterhaltsdienste, Heizung (stationär), Kleinverbraucher, Bus (bis Fahrplanwechsel 12/2015)
- **Geschäftsfeld Immobilien**
Heizung (stationär) und Kleinverbraucher

In Kombination aus Energieträgern, Geschäftsfeldern und Energieverwendung resultieren insgesamt 15 Energiebedarfsgruppen. Tabelle 4 stellt die Energiemengen der einzelnen Energiebedarfsgruppen nebst ihrem mittleren Anteil der Jahre 2014 und 2015 zusammen.

	2014	2015	mittlerer Anteil
Verkehr Bahn (Elektro)	11283493	11598815 kWh	75%
Verkehr Leit- und Sicherungstechnik (Elektro)	117091	137183 kWh	1%
Verkehr Weichenheizung (Elektro)	61505	62882 kWh	0%
Verkehr Weichenheizung (Gas)	27370	67780 kWh	0%
Verkehr Unterhaltsdienste (Benzin)	95708	87347 kWh	1%
Verkehr Unterhaltsdienste (Diesel)	901838	393002 kWh	4%
Verkehr Heizung (Erdöl/Heizöl)	634144	386676 kWh	3%
Verkehr Heizung (Gas)	252579	359088 kWh	2%
Verkehr Heizung (Wärme)	0	0 kWh	0%
Verkehr Kleinverbraucher (Elektro)	458734	482233 kWh	3%
Verkehr Bus (Diesel)	565873	699889 kWh	4%
Immobilien Heizung (Erdöl/Heizöl)	415053	152849 kWh	2%
Immobilien Heizung (Gas)	217941	298565 kWh	2%
Immobilien Heizung (Wärme)	47816	53112 kWh	0%
Immobilien Kleinverbraucher (Elektro)	281160	295562 kWh	2%
gesamt	15360304	15074983 kWh	100%

Tabelle 4: Energiebedarfsgruppen der Appenzeller Bahnen mit mittlerem Anteil 2014/2015

Die grafische Aufbereitung dieser Zahlen verdeutlicht die Dominanz des Traktionsenergiebedarfs (Verkehr Bahn, Elektro). Dieser ist zusammengesetzt aus Traktionsbetrieben, Traktionshilfsbetrieben und Komfortbetrieben (letztere subsummiert als Hilfsbetriebe) und repräsentiert 75 % der gesamten Energiemenge vor den Unterhaltsdiensten (Diesel) mit rund 4 %, Verkehr Bus (Diesel, bis 12/2015) mit 4 % sowie den stationären Verbrauchern Heizung Erdöl/Heizöl und den elektrischen Kleinverbrauchern mit je rund 3 % Anteil an der Energiemenge (Abbildung 12). Um den visuellen Aussagegehalt der Darstellung der Energiebedarfsgruppen zu steigern, sind in Abbildung 13 ausschliesslich die 25 % Gesamtenergiemenge ohne Traktionsenergie aufgeschlüsselt.

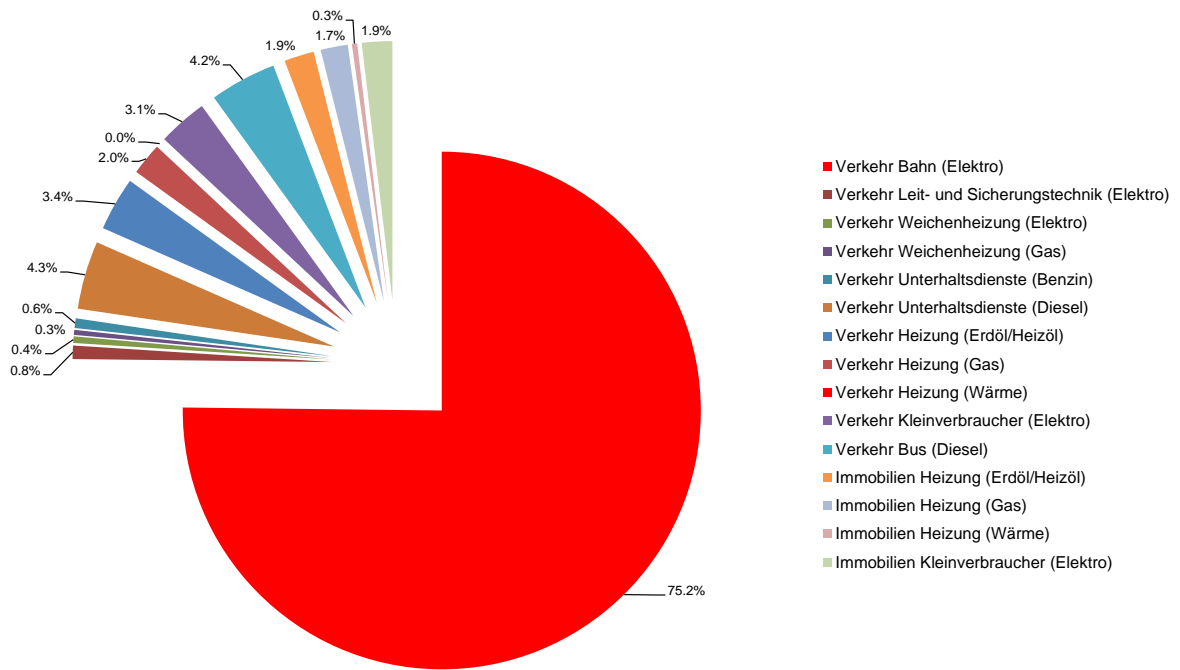


Abbildung 12: Mittlerer Anteil der Energiebedarfsgruppen der Appenzeller Bahnen 2014/2015

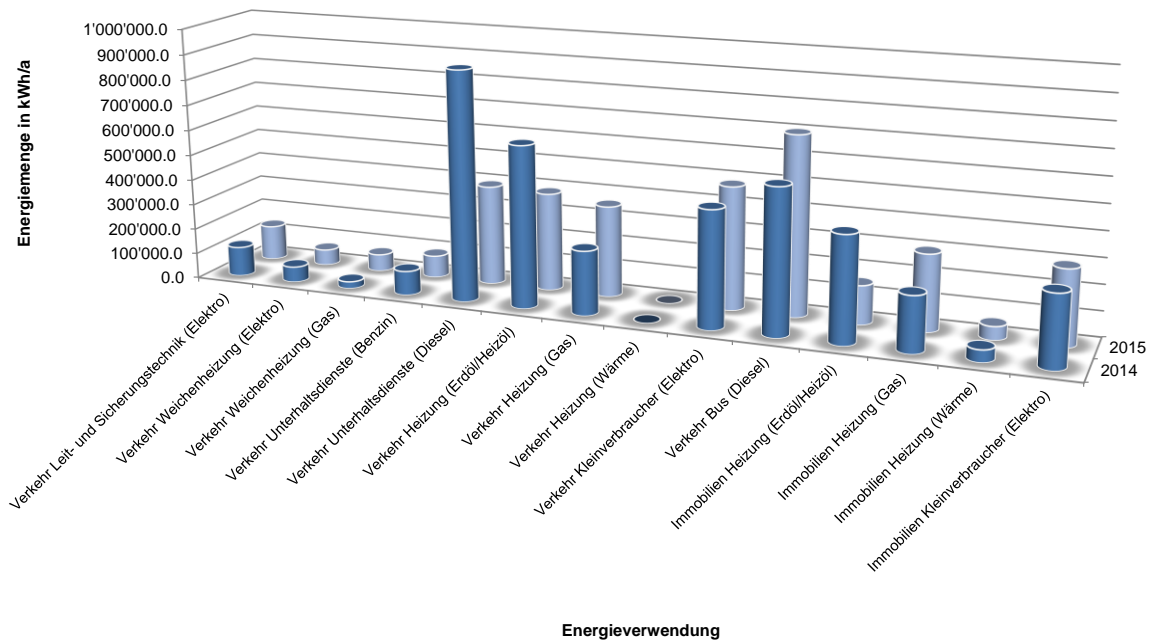


Abbildung 13: Energieverwendung der Energiebedarfsgruppen ohne Traktionsenergie 2014/2015

Für die Jahre 2014 und 2015 ergibt sich ein qualitativ und quantitativ sehr ähnliches Bild der Energieflüsse. Dies plausibilisiert die bereitgestellte Datenqualität. Zum Fahrplanwechsel im Dezember 2015 wurden die Busleistungen an die Postauto AG Ostschweiz abgegeben, so dass ab 2016 diese Energieverwendung des Diesels wegfällt.

Mit den verfügbaren Daten lässt sich der Energiefluss der Appenzeller Bahnen in Form von Sankeydiagrammen für 2014 (Abbildung 14) und 2015 (Abbildung 15) aufbereiten. Diese Darstellungsform stammt aus dem Stofffluss der Logistik. Die Breite der verwendeten Balken ist proportional zur Energiemenge. Für das Energiekonzept Appenzeller Bahnen werden fünf Stufen verwendet:

1. Stufe: Energiebezug ab Unternehmensgrenze AB
2. Stufe: Energieträger
3. Stufe: Energiebedarfsgruppen
4. Stufe: Zwischentotal für Fahren
5. Stufe: Energieverwendung

Zwischen Stufe 4 und 5 wird eine Aufschlüsselung der Energie im Fahrbetrieb vorgenommen. Diese unterscheidet Gleichrichterverluste (GR-Verluste), Fahrleitungsverluste (FL-Verluste), Antriebsverluste, Energie zum Betrieb von Heizung, Lüftung und Kühlung der Fahrzeuge (HLK-Betrieb) sowie Energie zum Fahren und Bremsen. Die Energieverwendungsgruppen Weichenheizung, Unterhaltsdienste, Kleinklektro und Gebäudeheizung setzen sich wiederum aus diversen Energiebedarfsgruppen zusammen.

Innerhalb aller Formen der Energieverwendung sind Optimierungen möglich und anzustreben. Die Dominanz der elektrischen Energie im Geschäftsfeld Verkehr für die Energiebedarfsgruppe Verkehr Bahn unterstreicht die Sinnhaftigkeit von Optimierungen in diesem Bereich: Bei der Traktionsenergie als Kerngeschäft der Bahn ist die resultierende Energiewirkung mit Abstand am grössten. Entsprechend sind mögliche Investitionen in vergleichsweise kurzer Zeit zu amortisieren.

Ein anderes Bild zeigt sich für das Themenfeld der Emissionsvermeidung klimaschädlicher Abgase: Hier verursachen die vergleichsweise kleinen Energiebedarfsgruppen fossiler Energieträger wie Benzin, Diesel, Erdöl, Erdgas quasi die gesamten Emissionen. Die Emissionsreduktion muss folglich bei diesen Energiebedarfsgruppen ansetzen. Das Energiekonzept Appenzeller Bahnen fokussiert primär auf die Steigerung der Energieeffizienz.

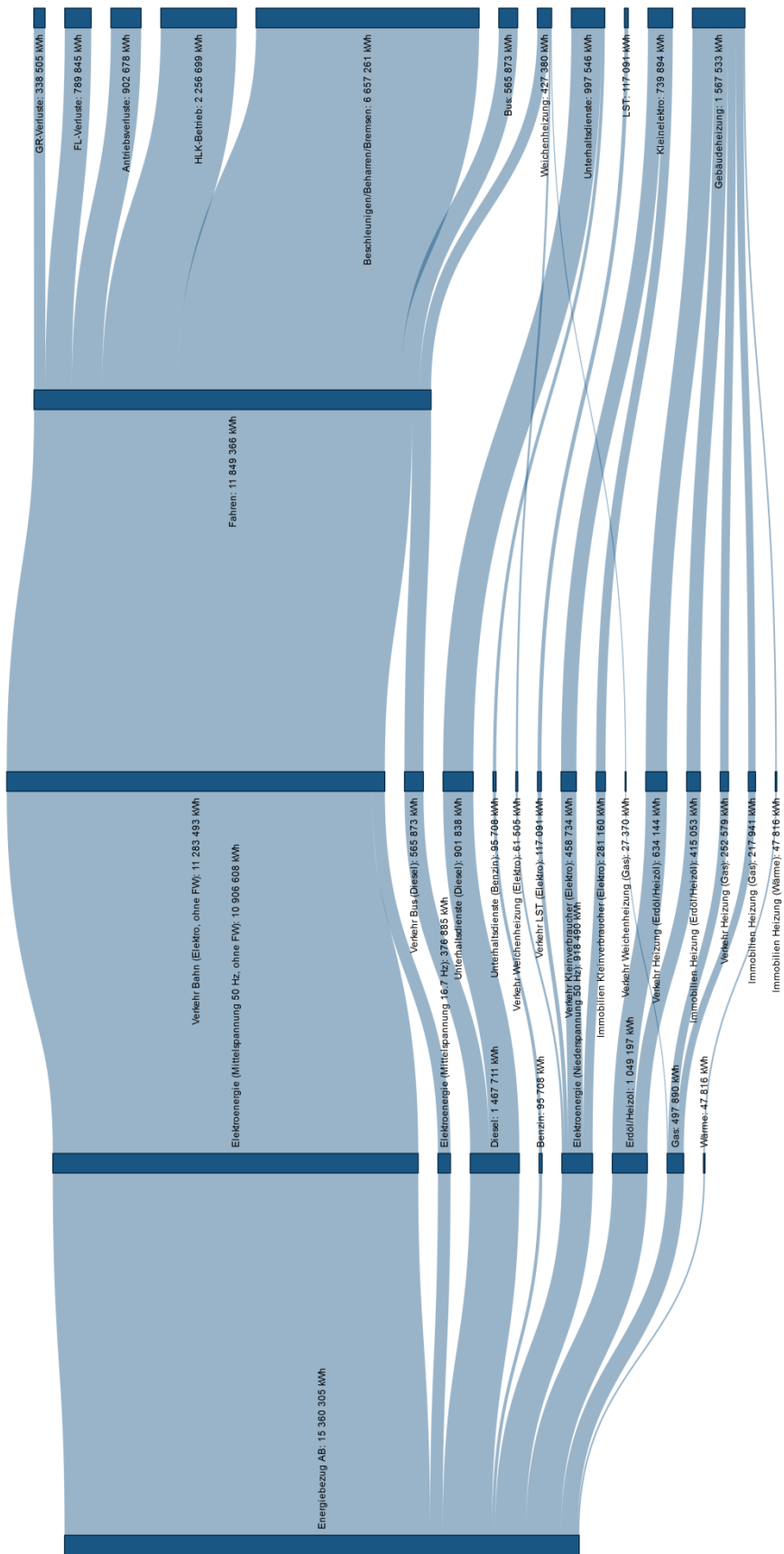


Abbildung 14: Energieflussdiagramm (Sankeydiagramm) der Appenzeller Bahnen 2014

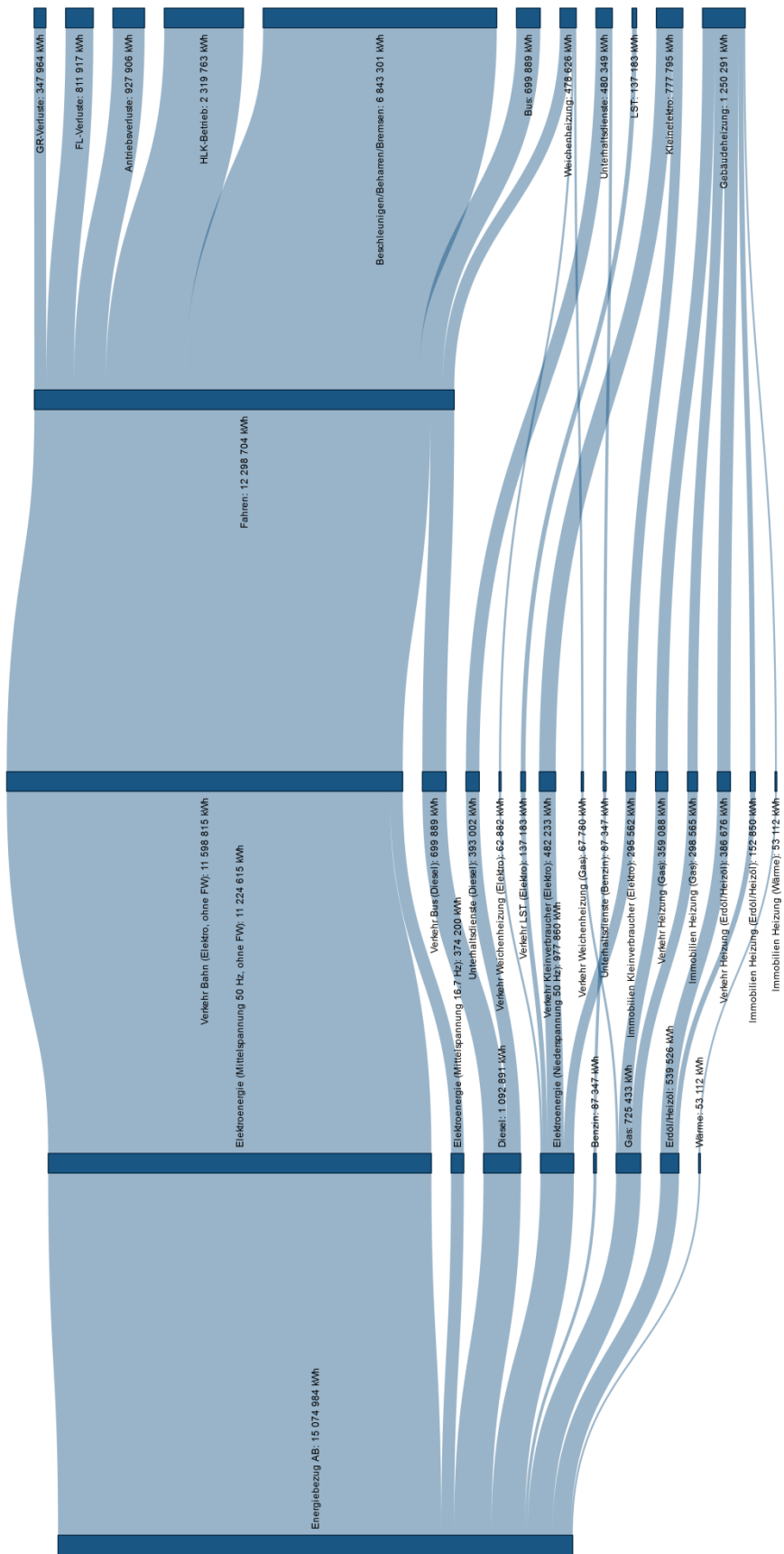


Abbildung 15: Energieflussdiagramm (Sankeydiagramm) der Appenzeller Bahnen 2015

4.2 Identifikation wichtiger Einflussfaktoren auf den Energiebedarf

Aufbauend auf den Analyseergebnissen der Energieflüsse sollen nun die Einflussfaktoren auf den Energiebedarf untersucht werden. Hierzu wird zunächst zwischen dem Traktionsenergiebedarf und dem stationären Energiebedarf unterschieden, da beide einer unterschiedlichen Logik folgen. Der Traktionsenergiebedarf ist die Summe aller Energien, welche unmittelbar für den Fahrbetrieb benötigt werden. Hierzu zählen die eigentliche Energie zum Fahren und Bremsen nebst der Traktionshilfsbetriebe sowie die Komfortbetriebe. Der stationäre Energiebedarf umfasst alle Formen der Energieverwendung in ortsfesten Anlagen jenseits des unmittelbaren Fahrens.

Sowohl beim Traktionsenergiebedarf als auch beim stationären Energiebedarf wird im Sinne der Einflussfaktoren unterschieden zwischen Angebot, Technik und Bahnproduktion. Unter dem Angebot werden alle planerischen Voraussetzungen eines möglichst energieeffizienten Bahnsystems verstanden. Die Technik umfasst traktionsseitig wie stationär die konkreten Ausrüstungen, Systeme und Komponenten des Bahnsystems. Schliesslich umfasst die Bahnproduktion den operativen Betrieb des Bahnsystems. Das Bahnsystem schliesst in dieser Betrachtung mit der Unternehmensgrenze der Ap-penzeller Bahnen ab.

Der jährliche Traktionsenergiebedarf setzt sich aus der Betriebsleistung und dem spezifischen Energiebedarf dieser Betriebsleistung zusammen. Über Luft- und Rollwiderstand wirkt die Fahrdynamik inklusive der Aerodynamik auf den spezifischen Energiebedarf. Die Fahrzeugeffizienz resultiert aus Antriebsverlusten nebst Hilfsbetrieben in Form der Traktionshilfsbetriebe und der Komfortbetriebe sowie aus Bremsverlusten. Weiter wirkt das Speisekonzept der Bahnenergieversorgung über die Bahnstromverluste ebenso auf den spezifischen Energiebedarf. Hervorzuheben ist das Zusammenspiel aus Angebot und Bahnproduktion – also der strategischen wie operativen Aspekte – für den resultierenden Energiebedarf. Abbildung 16 zeigt die gesamten Einflussfaktoren auf.

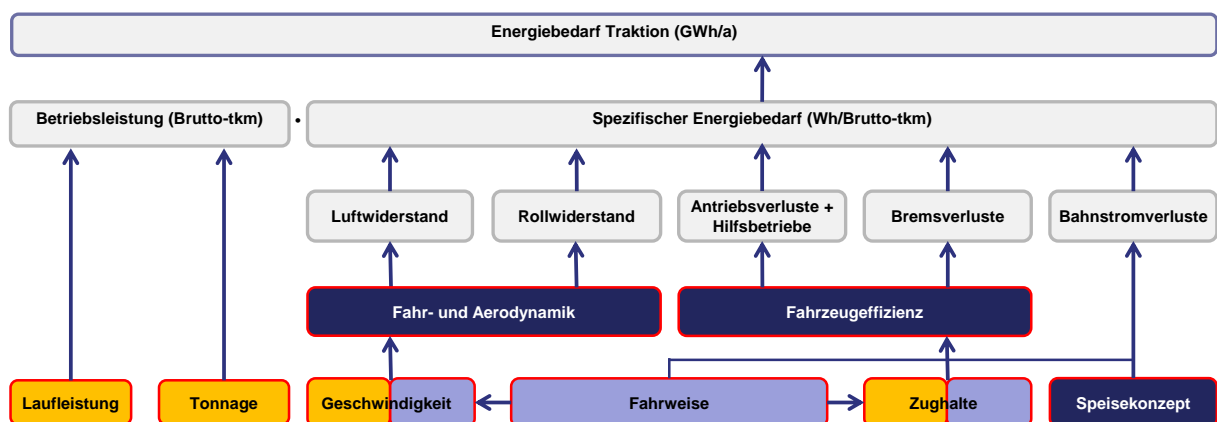


Abbildung 16: Einflussfaktoren auf den Traktionsenergiebedarf

Beim stationären Energiebedarf ist die Herleitung etwas einfacher, wenngleich die Anlagenheterogenität höher ausfällt. Auch dieser Wert ist in einer jährlichen Energiemenge darstellbar. Sie resultiert je Anlagengattung aus dem Anlagenpark inklusive der zugrundeliegenden Anlagenanzahl, der Anlageneffizienz basierend auf der Anlagenart sowie dem Anlagenbetrieb in Form der Betriebsdauer. Abbildung 17 visualisiert das Zusammenwirken dieser Einflussgrößen.

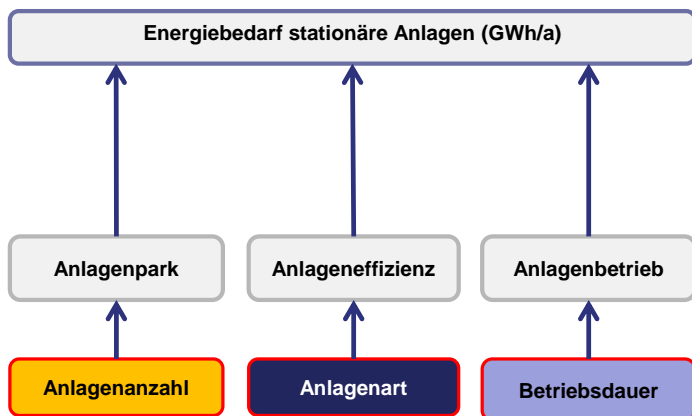


Abbildung 17: Einflussfaktoren auf den stationären Energiebedarf

Die Summe aus Traktionsenergiebedarf und stationärem Energiebedarf führt schliesslich auf den Gesamtenergiebedarf gemäss Abbildung 18. In dieser Betrachtung sind die Einflussgrößen aus dem Angebot gelb, die technischen Einflussgrößen dunkelblau und die Aspekte der Bahnproduktion hellblau gekennzeichnet. Im Sinne einer möglichst stringenten Aufarbeitung sind lediglich die Haupteinflüsse visualisiert.

Die Differenzierung der Energieeffizienzfaktoren in Angebot, Technik und Bahnproduktion beschreibt die Energieeffizienz im System Bahn auf systematischer Grundlage. Sie wird bei der Ableitung der Energieeffizienzmassnahmen weitere Anwendung finden.

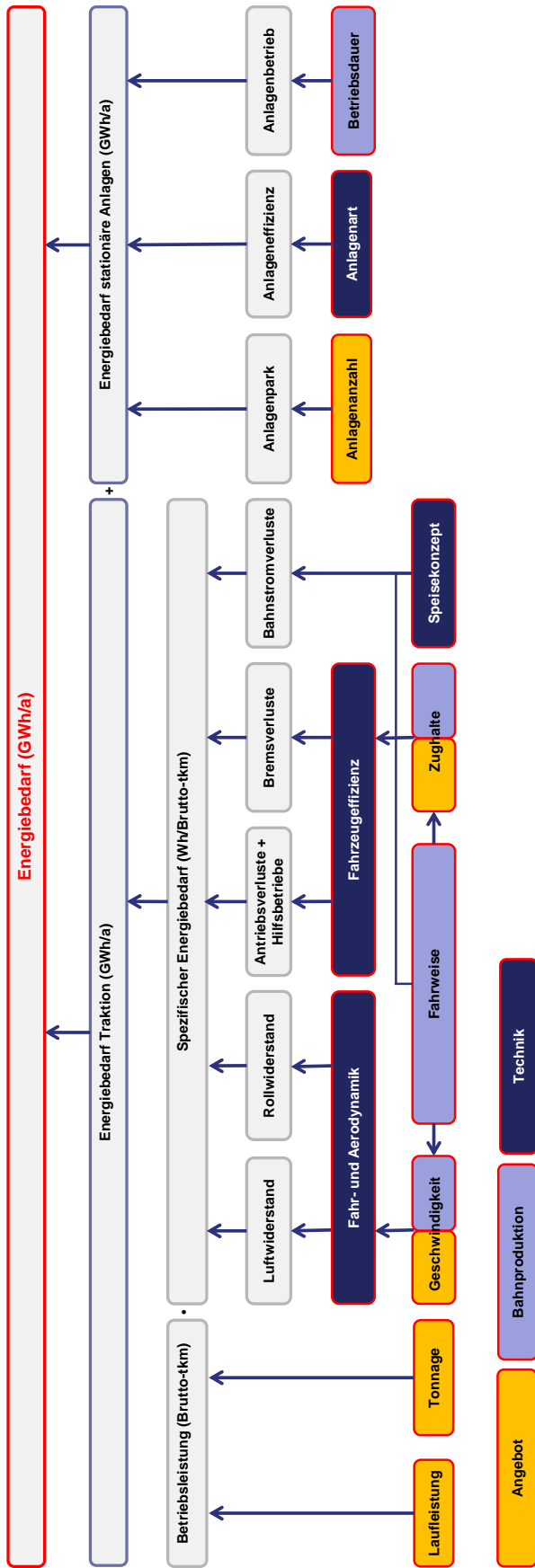


Abbildung 18: Einflussfaktoren auf den Gesamtenergiebedarf

4.3 Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz

4.3.1 Angebot

Unter dem Angebot werden alle planerischen Voraussetzungen eines energieeffizienten Bahnsystems verstanden (vgl. Kapitel 4.2). Zur Steigerung der Energieeffizienz bestehen drei Massnahmenfelder.

Liniennetz

Das Liniennetz der Appenzeller Bahnen ist als Achsenetz mit sechs S-Bahn-Linien klar strukturiert.

- S21 St. Gallen – Trogen 9.8 km (Fahrplanfeld 859)
- S22 St. Gallen – Gais – Appenzell 20.1 km (Fahrplanfeld 855)
- S23 Gossau SG – Appenzell – Wasserauen 32.1 km (Fahrplanfeld 854)
- S24 Altstätten Stadt – Gais 7.7 km (Fahrplanfeld 856)
- S25 Rorschach Hafen – Rorschach – Heiden 7.1 km (Fahrplanfeld 857)
- S26 Rheineck – Walzenhausen 1.9 km (Fahrplanfeld 858)



Abbildung 19: Liniennetz der Appenzeller Bahnen (AB-Homepage, Stand 12/2016)

Mit der Fertigstellung der Durchmesserlinie in St. Gallen Ende 2018 werden die Linien S21 und S22 zu einer betrieblichen Durchmesserlinie verknüpft. Auf der mitverwalteten Frauenfeld-Wil-Bahn besteht mit der S15 im Fahrplanfeld 841 eine 17.4 km lange Linie.

Aus Energieeffizienz sind Takte bis zum Halbstundentakt im Interesse eines attraktiven Gesamtangebots im ÖV mit Wahrung der Reisekette auch in der Nebenverkehrszeit akzeptabel, in den Randstunden jedoch von der (Rest-) Nachfrage abhängig. Ein selteneres Verkehren könnte zwar im System Bahn weitere Energie sparen, würde hingegen über Verlagerung zu energetisch ineffizienteren Verkehrsträgern die Energiebilanz des Verkehrs als Ganzes verschlechtern. In den Hauptverkehrszeiten – und nur dann – kann darüber hinaus das Einsetzen von Entlastezügen oder das generelle Einführen dichter Takte Sinn stiften.

Auf den Linien S21, S22, S23 und S15 besteht ein 30-min-Grundtakt. Die Linien S24, S25 und S26 verkehren grundsätzlich stündlich. In den Hauptverkehrszeiten besteht zwischen St. Gallen und Trogen (S21) eine Viertelstundentakt. Zwischen Appenzell und St. Gallen verkehrt montags bis freitags ein Entlastezug morgens nach und abends von St. Gallen. Die Linie S26 verkehrt montags bis freitags ergänzend morgens und abends im Halbstundentakt.

Die S15 (Frauenfeld-Wil-Bahn) ist montags bis freitags zusätzlich morgens und abends zwischen Wil SG und Wängi zum Viertelstundentakt verstärkt. Hierbei fällt auf, dass das letzte Verstärkerpaar Wil SG um 18:58 und Wängi um 19:07 Uhr ausserhalb der eigentlichen Hauptverkehrszeit (6 – 9 / 16 – 19 Uhr) verlässt. Zudem scheinen die 12-minütigen Wendezeiten in Wängi geeignet zu sein, auf die Fluchtfahrten nach Wängi GB zu verzichten und den Autoverkehr in diesen kurzen Zeiten auf die sehr nahe gelegene zweite Parkplatzeinfahrt auf der anderen Seite des Aufnahmegebäudes zu verweisen. Der Verzicht auf das beschriebene Fahrtenpaar und die kurzzeitigen Fluchtfahrten innerhalb Wängis sparen jährlich rund 16 MWh Elektroenergie.

Geschwindigkeitsprofile: Geschwindigkeitsspitzen

Die Geschwindigkeitsprofile sind historisch gewachsen und auf Grund von Topografie sowie Topologie stark heterogen ausgeprägt. Dies äussert sich in Geschwindigkeitsspitzen mit geringer räumlicher Ausdehnung. Abbildung 20 illustriert dies am Beispiel der Strecke Gossau SG – Appenzell – Wasserauen.

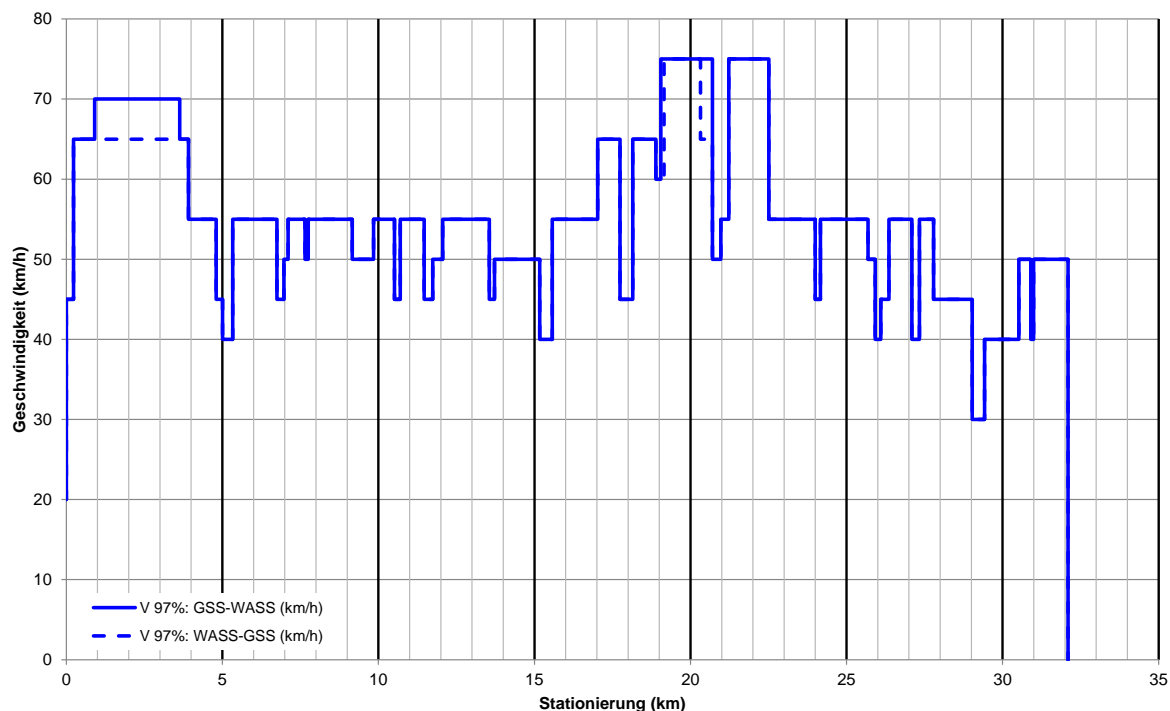


Abbildung 20: Geschwindigkeitsprofil Gossau SG (GSS) – Appenzell – Wasserauen (WASS) für beide Richtungen

Aus energetischer Sicht sind kurze Geschwindigkeitsspitzen unerwünscht, da sie gemessen am Resultat verkürzter Fahrzeit durch einen überproportionalen Leistungs- und Energiebedarf auffallen. Dabei gilt der Grundsatz, dass Energie in höheren Geschwindigkeiten und Fahrzeit in tieferen Geschwindigkeiten verloren gehen. Entsprechend wurden alle Strecken der Appenzeller Bahnen und die Frauelfeld-Wil-Bahn nach Geschwindigkeitsspitzen analysiert und im Ergebnis die Energieersparnisse und die maximal möglichen Fahrzeitverluste beim Nichtausfahren dieser Spitzen gegenübergestellt (Tabelle 5 und Abbildung 21).

Strecke	Stationierung	angrenzende Station	v _{max} (km/h) heute	v _{max} (km/h) neu	Länge (km)	Bemerkung
Gossau - Appenzell - Wasserauen (GAW)	0.910 - 3.633	Gossau - Herisau (kurz, bergwärts)	70	65	2.72	nur bergwärts
	0.230 - 3.917	Gossau - Herisau (lang)	65	60	3.69	Alternative
	19.150 - 20.700	Alpsteinblick - Gonten	75	60	1.55	
	21.227 - 22.510	Gonten - Gontenbad	75	60	1.28	
St. Gallen - Gais - Appenzell (SGA)	1.150 - 1.752	St. Gallen - Riethüsli (bergwärts)	60	50	0.60	nur bergwärts
	2.767 - 3.475	Liebegg - Lustmühle	65	60	0.71	
	9.283 - 10.042	Steigbach - Bühler	65	60	0.76	
	14.438 - 16.015	Gais - Sammelplatz	65	60	1.58	
Altstätten - Gais (AG)	5.550 - 6.327	Schachen - Hebrig	65	50	0.78	
St. Gallen - Trogen (TB)	1.860 - 2.344	Schülerhaus - Birnbäumen (bergwärts)	60	50	0.48	nur bergwärts
	2.425 - 2.587	Birnbäumen - Notkersegg (unten, bergwärts)	60	50	0.16	nur bergwärts
	2.711 - 3.062	Birnbäumen - Notkersegg (oben, bergwärts)	60	50	0.35	nur bergwärts
	4.784 - 5.228	Schwarzer Bären - Rank	60	50	0.44	
	5.402 - 5.717	Rank - Vögelinsegg (bergwärts)	60	50	0.32	nur bergwärts
Frauenfeld - Wil (FW)	0.629 - 0.970	Wil - Schweizerhof (oben)	75	70	0.34	
	1.166 - 3.040	Wil - Schweizerhof (unten)	80	70	1.87	
	3.040 - 3.325	Schweizerhof - Münchwilen TG	75	70	0.29	
	12.768 - 12.998	Weberei Matzingen - Murkart (oben)	70	60	0.23	
	12.998 - 13.825	Weberei Matzingen - Murkart (unten)	75	60	0.83	

Tabelle 5: Zeit- und Energiewirkung von Geschwindigkeitsspitzen

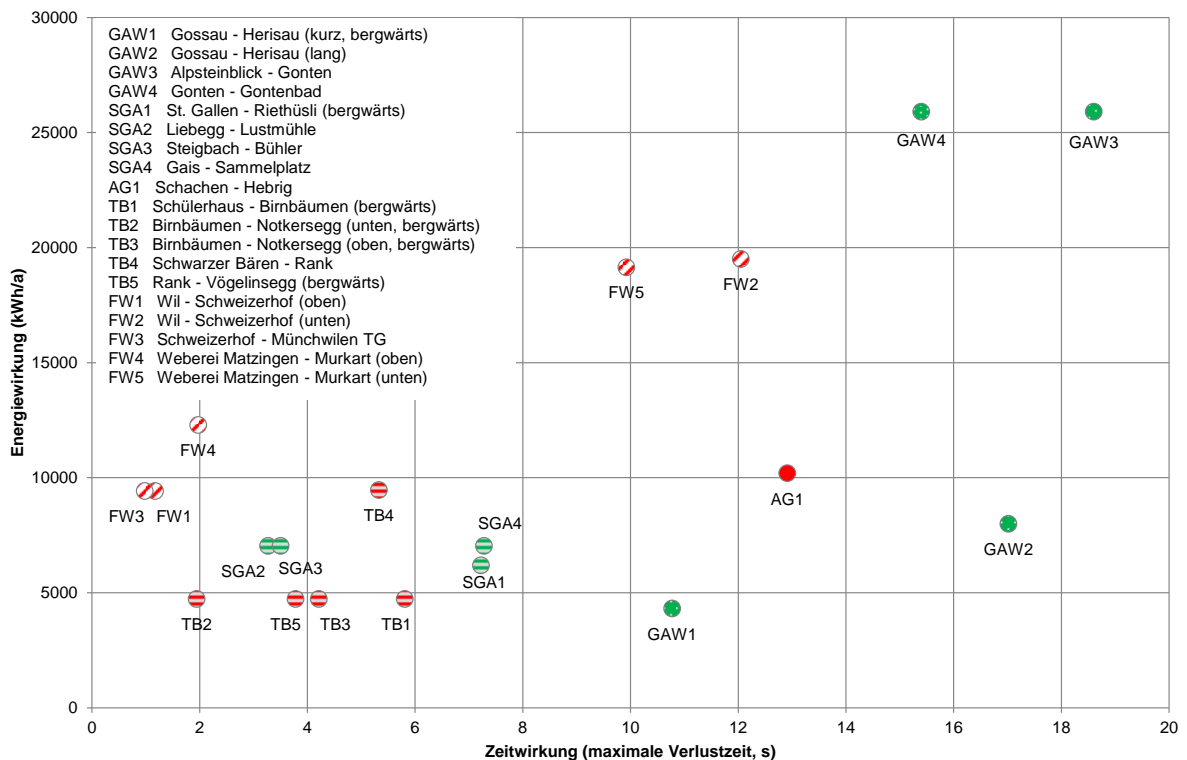


Abbildung 21: Zeit- und Energiewirkung von Geschwindigkeitsspitzen

Keine der 19 analysierten Geschwindigkeitsspitzen bewirkt eine Fahrzeitverkürzung von über 20 s. Insgesamt 13 der analysierten Geschwindigkeitsspitzen führen zu maximal 10 s Fahrzeitverkürzung. Kalibriert um das jährliche Betriebsprogramm bewirkt das Nichtausfahren dieser Spitzen eine Energieeinsparung von rund 106 MWh Elektroenergie. Alle 19 Geschwindigkeitsspitzen zusammen reduzieren beim Nichtausfahren die Elektroenergie um bereits 192 MWh ohne nennenswerte betriebliche Konsequenzen.

Geschwindigkeitsprofile: Halt auf Verlangen

Auf dem Netz der Appenzeller Bahnen sowie auf der Frauenfeld-Wil-Bahn ist die Betriebsweise Halt auf Verlangen langjährig erprobt. In Steigbach und Sammelplatz (Strecke St. Gallen – Appenzell) finden Bedarfshalte auch an Stationen mit Zugkreuzungen Anwendung. Die Betriebsweise mit Halt auf Verlangen nutzt die Tatsache, dass ein Teil der angebotenen Fahrplanhalte nicht zum Ein- und Aussteigen genutzt wird, und erlaubt dem Triebfahrzeugführer an nicht genutzten Haltestellen oder Bahnhöfen ohne Stopp vorbeizufahren. Damit können Energie zum Wiederauffahren und Fahrzeit für eine energieeffiziente Fahrt im nachfolgenden Streckenabschnitt gespart werden. Basierend auf der umfangreichen Anwendung dieser Betriebsweise kommen noch vier Stationen zur Ausdehnung von Halt auf Verlangen in Frage, welche diese Betriebsweise noch nicht kennen und nicht Linienendpunkt sind:

- Waldstatt (Fahrplanfeld 854, Streckenabschnitt Gossau SG – Appenzell, Abbildung 22)
- Weissbad (Fahrplanfeld 854, Streckenabschnitt Appenzell – Wasserauen)
- Teufen (Fahrplanfeld 855, Strecke St. Gallen – Appenzell, Abbildung 23)
- Bühler (Fahrplanfeld 855, Strecke St. Gallen – Appenzell, Abbildung 24)



Abbildung 22: Station Waldstatt (21.04.2017, Foto: Steffen Schranil)

Abbildung 23: Station Teufen auf Seite St. Gallen (21.04.2017, Foto: Steffen Schranil)

Abbildung 24: Station Bühler mit Einfahrtssignal auf Seite Appenzell (21.04.2017, Foto: Steffen Schranil)

Der erwartete Beitrag zur Energieeffizienz durch Halt auf Verlangen beträgt für diese vier Stationen in Summe 15 MWh Elektroenergie jährlich. Kritisch ist die Einschaltung von nahegelegenen Bahnübergängen, welche höhere Schliesszeiten oder teure Anpassungen der Steuerung erfordern.

Geschwindigkeitsprofile: Fahr- und Reservezeitverteilung

Die Analyse der Fahrplanzeiten (Tabelle 6 und Tabelle 7) zeigt auf, dass die Reservezeiten insbesondere vor Linienendpunkten und Anschlussknoten in den Fahrplan eingefügt sind. Dies führt auf allen Strecken zu richtungsspezifisch abweichenden Durchschnittsgeschwindigkeiten bezüglich der Fahrplanzeiten. Vor Linienende und Anschlussknoten lässt sich die scheinbare Verfrühung bei pünktlicher Fahrt in energieeffiziente tiefere Geschwindigkeiten umsetzen. In allen anderen Abschnitten führt die angespannte Fahrzeit bei scheinbarer Verspätung zu höheren Geschwindigkeiten und somit nicht zur Energieeffizienz. Aus diesem Grund wird eine etwas gleichmässige Verteilung der Reservezeiten vorgeschlagen. Ein Abgleich mit Fahrzeitmessungen bestätigte die Fahrbarkeit dieses Ansatzes. Energetisch wird daraus ein ähnliches Potenzial wie bei den Geschwindigkeitsspitzen erwartet.

Fahrplan Soll									
Fahrplan Ist									
Station	Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	v hin (km/h)	v rück (km/h)	Δv (km/h)	Bemerkungen	Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	Δv (km/h)
Fahrplanfeld 854									
Gossau SG	7	6	43	50	7		7	6	43
Herisau	4	4	53	27	27	rück: 1 min Aufenthalt	3	3	36
Wilten	4	3	37	50	12		4	3	37
Waldstatt	6	7	28	24	4		6	6	28
Zürchersmühle	3	1	62	187	124		3	3	62
Urnäsch	5	7	47	33	13		5	7	47
Jakobsbad	2	2	55	55	0		2	2	55
Gonten	3	3	41	41	0		3	3	41
Gontenbad	7	3	26	60	34		4	4	45
Appenzell	2	4	56	28	28	1 min Aufenthalt	4	3	28
Steinegg	3	2	25	37	12		2	2	25
Weissbad	2	3	40	26	13		2	3	40
Schwende	4	2	26	53	26		3	2	35
Wasserauen									
	50	47					49	47	
Fahrplanfeld 855									
Station	Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	v hin (km/h)	v rück (km/h)	Δv (km/h)	Bemerkungen	Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	Δv (km/h)
St. Gallen	5	7	27	19	8		5	7	27
St. Gallen Rietbüsli	3	4	33	25	8		3	4	33
Lustmühle	3	3	26	26	0		3	3	26
Niederlaufen	1	1	37	37	0		1	1	37
Stemen bei Teufen	1	1	33	33	0		1	1	33
Stofel	3	2	17	25	8		3	2	17
Teufen	3	5	42	25	17	1 min Aufenthalt	3	4	42
Steigbach	4	2	21	41	21		3	3	28
Bühler	2	2	43	43	0		3	2	28
Strahlholz	3	2	26	40	13		2	2	26
Zweibrücken	4	1	8	32	24		3	2	16
Gais	3	5	44	27	18	1 min Aufenthalt	4	4	33
Sammelplatz	3	4	46	34	11		4	4	34
Hirschberg	4	2	20	50	30		3	2	33
Appenzell	5	2					4	2	50
	43	41					42	41	
Fahrplanfeld 856									
Station	Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	v hin (km/h)	v rück (km/h)	Δv (km/h)	Bemerkungen	Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	Δv (km/h)
Gais	2	6	39	13	26		2	4	39
Hebrig	1	1	55	55	0		1	1	55
Schachen (Gais)	1	1	45	45	0		1	1	45
Rietli	1	1	38	38	0		1	1	38
Stoss AR	4	3	14	19	5		4	3	14
Kreuzstrasse	3	1	14	41	28		2	2	14
Warmesberg	3	2	15	23	8		3	2	15
Alter Zoll	7	4	14	25	11		7	4	14
Altsätten Stadt									
	22	19					22	18	

Tabelle 6: Fahrzeiten gemäss Fahrplan und Optimierung der Fahrplanfelder 854, 855 und 856

Fahrplan ist										Fahrplan Soll									
Fahrplanfeld 857		Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	v hin (km/h)	v rück (km/h)	Δv (km/h)	Bemerkungen	Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	v hin (km/h)	v rück (km/h)	Δv (km/h)							
Station		2	2	29	29	0		2	2	29	29	0	2	2	29	29	0		
Rorschach Hafen		2	2	29	29	0		2	2	29	29	0	2	2	29	29	0		
Seeböschle		1	5	17	17	7	10 min Aufenthalt	3	1	19	19	9	5	11	11	7	4		
Sandbüchel		3	3	29	29	0		3	3	29	29	0	3	3	29	29	0		
Waltensee		2	2	25	25	0		2	2	25	25	0	2	2	25	25	0		
Wienacht-Tobel		3	3	22	22	0		3	3	22	22	0	3	3	22	22	0		
Schwendi b. Heiden		8	5	14	14	9		7	5	16	16	7	5	16	16	7	7		
Heiden		21	22					21	22				21	22					
Fahrplanfeld 858		Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	v hin (km/h)	v rück (km/h)	Δv (km/h)	Bemerkungen	Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	v hin (km/h)	v rück (km/h)	Δv (km/h)							
Station		1	4	42	42	11		1	2	42	42	21	1	2	42	42	21		
Rheineck		1	4	42	42	11		1	2	42	42	21	1	2	42	42	21		
Ruderbach		5	5	15	15	0	0 nicht in Fahrplanfeld	5	5	15	15	0	5	5	15	15	0		
Walzenhausen		6	9					6	7				6	7					
Fahrplanfeld 859		Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	v hin (km/h)	v rück (km/h)	Δv (km/h)	Bemerkungen	Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	v hin (km/h)	v rück (km/h)	Δv (km/h)							
Station		2	5	25	10	15		2	3	25	25	17	2	3	25	25	17		
St. Gallen		2	5	25	10	15		2	3	25	25	17	2	3	25	25	17		
St. Gallen Marktplatz		2	1	9	9	9		1	1	18	18	0	1	1	18	18	0		
St. Gallen Spisertor		1	2	37	19	19		2	2	19	19	0	2	2	19	19	0		
St. Gallen Schülerhaus		1	2	35	17	17		1	1	35	35	17	1	1	35	35	17		
St. Gallen Birnbäumen		3	1	16	48	32		3	2	16	16	24	3	2	16	16	24		
St. Gallen Nöikersegg		3	2	28	4	24		3	2	28	28	42	3	2	28	28	42		
St. Gallen Nöikersegg		3	2	47	24	24		3	2	47	47	24	3	2	47	47	24		
Schwarzer Bären		3	2	36	12	24		2	2	36	36	36	2	2	36	36	36		
Rank		3	2	23	23	0		2	2	23	23	0	2	2	23	23	0		
Vögelinsegg		2	1	23	23	0		1	1	23	23	0	1	1	23	23	0		
Schützengarten		1	1	23	23	0		1	1	23	23	0	1	1	23	23	0		
Speicher		2	1	25	50	25	1 min Aufenthalt	2	2	25	25	0	2	2	25	25	0		
Bendlehn		2	2	24	24	0		2	2	24	24	0	2	2	24	24	0		
Gfeld		1	1	32	32	0		1	1	32	32	0	1	1	32	32	0		
Trogen		24	24					24	24				24	24					
Fahrplanfeld 841		Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	v hin (km/h)	v rück (km/h)	Δv (km/h)	Bemerkungen	Fahrzeit hin (min)	Fahrzeit rück (min)	v hin (km/h)	v rück (km/h)	Δv (km/h)							
Station		2	4	18	9	9		3	3	12	12	12	3	3	12	12	12		
Frauenfeld		2	4	18	9	9		3	3	12	12	12	3	3	12	12	12		
Frauenfeld Marktplatz		2	2	52	52	0		2	2	52	52	0	2	2	52	52	0		
Ludern		2	2	36	36	0		2	2	36	36	0	2	2	36	36	0		
Murkart		2	2	39	39	0		2	2	39	39	0	2	2	39	39	0		
Weberer Matzingen		2	2	34	34	0		2	2	34	34	0	2	2	34	34	0		
Matzingen		2	2	50	50	0		2	2	50	50	0	2	2	50	50	0		
Jakobstal		1	3	16	32	16		1	1	48	48	0	1	1	48	48	0		
Wiesengrund		2	2	44	22	22		2	2	44	44	22	2	2	44	44	22		
Wängli		3	1	106	71	35		3	3	37	37	0	3	3	37	37	0		
Rosental		2	3	55	37	18		2	3	37	37	0	2	3	37	37	0		
Münchwilen Pflegeheim		2	2	23	23	0		2	2	23	23	0	2	2	23	23	0		
Münchwilen TG		7	4	33	58	25		5	4	47	47	58	4	4	47	47	58		
Wil SG		29	28					29	28				29	28					

Tabelle 7: Fahrzeiten gemäss Fahrplan und Optimierung der Fahrplanfelder 857, 858, 859 und 841 (FW)

Transportgefässeinsatz

Der Transportgefässeinsatz der Appenzeller Bahnen wird sich mit der laufenden Modernisierung stark wandeln. Damit einhergehend wird das Spektrum der eingesetzten Transportgefässe überschaubarer:

- Strecke Gossau SG – Appenzell – Wasserauen: 5 dreiteilige Triebzüge
- DML-Strecke Trogen – St. Gallen – Appenzell: 11 sechsteilige Triebzüge
- Strecke Frauenfeld – Wil: 5 dreiteilige Triebzüge (seit 2013)

Die weiteren Strecken bleiben im Transportgefässeinsatz nach der Modernisierung unverändert. Das Triebzugkonzept zwischen Gossau SG und Wasserauen sieht darüber hinaus dreiteilige Verstärkermodule vor. Diese kommen jedoch nur an Tagen absoluter (touristischer) Spitzennachfrage zum Einsatz. Gegenüber einer integralen Umstellung auf Triebzug mit Modul spart dieses Modulkonzept jährlich rund 564 MWh Elektroenergie.



Abbildung 25: Rohbau eines DML-Endwagens im Stadlerwerk Bussnang (20.05.2017, Foto: Steffen Schranil)

4.3.2 Technik Traktion

Die Technik umfasst traktionsseitig wie stationär die konkreten Ausrüstungen, Systeme und Komponenten des energieeffizienten Bahnsystems (vgl. Kapitel 4.2). Der traktionsseitige Energiebedarf setzt sich aus drei Betriebsgruppen zusammen, welche ihrerseits Optimierungsansätze bieten:

- **Traktionsbetriebe**
Energiebedarf zum Beschleunigen und Bremsen sowie zur Überwindung der Fahrwiderstände (eigentliches Fahren)
- **Traktionshilfsbetriebe**
Hilfsbetriebe zur technischen Unterstützung der Traktion wie Kompressoren, Pumpen und Ventilatoren
- **Komfortbetriebe**
Hilfsbetriebe zur Komfortsteigerung von Endkunden und Personal wie Heizung, Lüftung und Kühlung/Klimatisierung (HLK)

Die Auslegung der Traktionsbetriebe moderner Schienenfahrzeuge mit Drehstromantriebstechnik setzt auf den Einsatz von IGBT-Umrichtern, welche durch vergleichsweise geringe Verluste auffallen. Der jeweilige Antriebsstrang ist dahingehend optimiert, dass bei ausbleibender Zugkraftanforderung eine Taktsperrung ausgegeben wird, welche die Schaltverluste minimiert. Im Teillastbetrieb steigert die Motorflussoptimierung die Effizienz des Antriebsstrangs. Gleichzeitig wird eine hohe Rückspeisung (Rekuperation) von Bremsenergie in das Fahrleitungsnetz durch einen grösstmöglichen Anteil elektrischer Bremse ermöglicht. Die Traktionshilfsbetriebe werden bedarfsgerecht auf Basis von geforderter Traktionsleistung und gemessener Temperaturwerte geregelt. Damit werden eine zu schwache und eine zu starke Kühlung der Traktionskomponenten im Interesse eines Gesamtoptimums des Antriebsstrangs aus Umrichter und Fahrmotor vermieden.

Die Komfortbetriebe werden ebenso bedarfsgerecht betrieben. Dies betrifft insbesondere die Frischluftzufuhr in den Fahrgastraum und damit einhergehend die Temperierung der zugeführten Umgebungsluft. In der Abstellung werden die Komfortbetriebe abgeschaltet und erst rechtzeitig vor dem nächsten kommerziellen Einsatz wieder hochgefahren (Schlummerbetrieb). Aus Komfortgründen erhalten die Neufahrzeuge eine Klimatisierung, was den Energiebedarf gegenüber heute steigert. Am Beispiel der Frauenfeld-Wil-Bahn führt der Einsatz eines grösseren und klimatisierten Neufahrzeugs gegenüber dem Altfahrzeug mit den neuen Traktionsmöglichkeiten zu einem Energiemehrbedarf im zweistelligen Prozentbereich.

Die bestellten Neufahrzeuge berücksichtigen die Optimierung dieser drei Bedarfsgruppen bereits ab Werk. Die Optimierungen von Traktions- und Traktionshilfsbetrieben reduzieren den jährlichen Energiebezug gegenüber dem bisherigen Stand der Antriebstechnik um rund 370 MWh.

4.3.3 Technik stationär

Bahnenergieversorgung

Die heutige Bahnenergieversorgung ist historisch gewachsen mit den folgenden Systemen:

- **Stammnetz** (Gossau – Wasserauen, St. Gallen – Appenzell, Altstätten Stadt – Gais)
1.5 kV DC 7 Gleichrichter
- **Frauenfeld – Wil-Bahn**
1.2 kV DC 3 Gleichrichter
- **St. Gallen – Trogen**
1.0 kV DC 3 Gleichrichter (im Stadtverkehr St. Gallen 0.6 kV DC, 1 Gleichrichter)
- **Rheineck – Walzenhausen**
0.6 kV DC 1 Gleichrichter
- **Rorschach Hafen – Rorschach – Heiden**
15 kV / 16.7 Hz Bezug via SBB ab Rorschach

Die Bahnenergieversorgung mit Gleichstrom (DC) bietet die Herausforderung der Leistungsübertragung bei vergleichsweise tiefen Spannungen, was zu hohen Strömen führt. Letztere gehen quadratisch in die Verlustbilanz ein. Aus diesem Grund und zur Vereinheitlichung der Infrastruktur wird die Strecke St. Gallen – Trogen mit Inbetriebnahme der Durchmesserlinie mit 1.5 kV statt der heutigen 1.0 kV Nennspannung betrieben, was die Fahrleitungsverluste bereits um 62 MWh jährlich reduziert. Innerhalb der Stadt St. Gallen ist dies mit Rücksicht auf den Mischbetrieb mit Trolleybussen und die resultierenden grösseren Schutzabstände jedoch weiterhin nicht möglich.



Abbildung 26: Gleichrichter Appenzell (15.05.2016, Foto: Steffen Schranil)

Um die Fahrleitungsverluste zu minimieren wird daher am Unterwerk mit der höchsten dauerhaft zulässigen Spannung eingespiesen. Beim elektrischen Bremsen wird mechanische Energie des Fahrzeugs in elektrische Energie zurückgewandelt und ins Fahrleitungsnetz eingespiesen. Je nach dessen Aufnahmefähigkeit und dem Vorhandensein weiterer Verbraucher im Netz steht die rekuperierte Energie anderen Fahrzeugen zur Verfügung. Die Durchschaltung der Speiseabschnitte vergrössert die Wahrscheinlichkeit der Wiederverwendung der Energie und somit den Anteil rückgespeicherter Energie. In diesem Kontext wird der Gleichrichter Bavaria rückspeisefähig gestaltet, um Bremsenergie ins 50-Hz-Landesnetz zurückspeisen zu können, auch wenn kein Energieabnehmer im durchgeschalteten Bahnnetz verfügbar ist.

Der Leistungsausbau bestehender elektrischer Bahnnetze ist anspruchsvoll. Wird nicht die doppelte Anzahl an bestehenden Unterwerken benötigt, stehen die bestehenden Gleichrichter im Widerspruch zum Netzausbau mit verkürzten Speiseabschnitten oder vergrösserten Standorten. Einen Ausweg bietet der Einsatz nachregulierbarer rückspeisefähiger Gleichrichter. Diese neuartige Entwicklung maximiert die Möglichkeit der elektrischen Bremsenergie rückgewinnung in Abhängigkeit des Sammelschienenstroms am Gleichrichterstandort:

- Speisung mit maximal zulässiger Sammelschienenenspannung bei positivem Summenstrom
- Speisung mit minimal zulässiger Sammelschienenenspannung bei negativem Summenstrom

Diese Unterscheidung anhand des Sammelschienen-Summenstroms im Gleichrichter bewirkt, dass im Bremsbetrieb die maximal mögliche Leistung bzw. Energie der Fahrzeuge in das Bahnenergieversorgungssystem und schliesslich in das Landesnetz zurückgespiesen werden können. Dies führt vor allem im bergigen Gelände und bei verglichen mit Metrosystemen grossen Takten (hier 30-min-Takt) zu beachtlichen Energieeinsparungen. Allein für die drei Gleichrichter der Frauenfeld-Wil-Bahn lässt die Umrüstung auf nachregulierbare rückspeisefähige Gleichrichter nach konservativen Schätzungen eine jährliche Einsparung elektrischer Energie von 506 MWh erwarten.

Weichenheizung

Die Weichenheizung hält im winterlichen Betrieb die Weichen und somit den bezüglich Spurführung sensibelsten Teil des Fahrwegs schnee- und eisfrei (Abbildung 27). Auf dem Netz der Appenzeller Bahnen geschieht dies überwiegend mit Elektroenergie aus den Gleichrichtern. Zum Teil versorgt ein örtlicher Stromanschluss aus dem 50-Hz-Netz die elektrische Weichenheizung mit Energie; zu einem dritten deutlich kleineren Teil der Energiemenge (Abbildung 15) kommen Gasheizungen zum Einsatz.



Abbildung 27: Elektrische Weichenheizung in Bühler (21.04.2017, Foto: Steffen Schranil)

Der Vorteil des grösseren Leistungsgradienten bei Gasweichenheizungen lässt sich durch zeit- und temperaturoptimierte Einsatzprofile der elektrischen Weichenheizung kompensieren. Das automatische Ein- und Ausschalten der Weichenheizungen auf Basis von Temperaturverlaufsmessung und Wetterdaten hilft, die Anzahl der effektiven Betriebsstunden und somit den Energiebedarf der Weichenheizung gegenüber einer Festzeitsteuerung oder gar dem manuellen Ein- und Ausschalten zu senken. Beim Verzicht auf Gasweichenheizung wird zugleich ein Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen ermöglicht. Darüber hinaus bestehen verschiedene Pilotanwendungen zu alternativen Energieversorgungen von Weichenheizungen, beispielsweise durch Nutzung von Erdwärme. Der Nachweis der Anwendung in schneeeintensiven Gebirgslagen steht hingegen noch aus. Die Ausdehnung des automatischen elektrischen Weichenbetriebs auf alle 91 Weichen vom AB-Stammnetz nebst der Strecke St. Gallen – Trogen ermöglicht eine jährliche Energieeinsparung von rund 243 MWh.

Gebäudeheizung

Das Immobilienportfolio der Appenzeller Bahnen ist historisch gewachsen und im Kontext von Denkmal- und Heimatschutz nur bedingt gestaltbar. Bei grösseren Umbauten oder gar Neubauten bietet sich eine energetische Optimierung nach folgenden Kriterien an:

- Wärmeisolation der Gebäudeaussenhülle
- Wärmeisolation der Gebäudeinnenhülle (Alternative zur Aussenhülle)
- Wärmeisolation von Fenstern und Türen
- Wärmeisolation des Dachs
- Modernisierung der Heizung



Abbildung 28: Heutiges Depot Appenzell (Foto: Steffen Schranil, 21.04.2017)

Für Immobilien der Schienenfahrzeuginstandhaltung ist den vergleichsweise grossen Toren Aufmerksamkeit zu schenken. Torluftschleier können hier helfen, das Gebäude auch bei Ein- und Ausfahrt der Fahrzeuge nicht zu tief abkühlen zu lassen. Zudem sind eine bedarfsgerechte Beheizung und Belüftung sowie eine Absenkung der Gebäudeinnentemperatur in arbeitsfreien Zeiten anzustreben. Das geplante neue Instandhaltungszentrum in Appenzell berücksichtigt diese Aspekte im Gegensatz zum bestehenden Gebäude (Abbildung 28) weitestgehend.

4.3.4 Bahnproduktion

Die Bahnproduktion umfasst den operativen Betrieb des energieeffizienten Bahnsystems (vgl. Kapitel 4.2). Hierzu zählen insbesondere die Fahrweise und die Disposition der Zugfahrten.

Fahrweise

Über die Fahrweise haben die Triebfahrzeugführer einen wesentlichen Einfluss auf die Energieeffizienz der Fahrt. Eine effiziente Fahrtrajektorie beinhaltet:

- Beschleunigen mit maximaler Zugkraft
- Beharrung auf der zulässigen Geschwindigkeit
- Ausrollen mit abgeschalteter Zugkraft
- elektrisches Bremsen bis nahe Stillstand

Für eine Fahrt zwischen zwei Stationen gibt es eine minimal mögliche Fahrzeit und einen minimal möglichen Energiebedarf. Soll nun die Energieeffizienz in tendenziell schwachen DC-Bahnstromnetzen bei möglichst geringem Fahrzeitverlust gesteigert werden, resultiert die nachfolgende Priorisierung:

- Maximierung des Ausrollens
- Reduktion der Maximalgeschwindigkeit (vgl. Thematik Geschwindigkeitsspitzen in 4.3.1)
- Verringerung der Anfahrbeschleunigung

Der Leistungsbedarf und damit einhergehend der Energiebedarf im Bahnstromnetz schwankt über den Tag immens. Neben dem Tagesgang der Nachfrage zählt die Fahrweise der Triebfahrzeugführer in diesen Aspekt ein. Zur Visualisierung dieses Aspektes fanden am 07.03.2017 Führerstandsmittfahrten auf der Frauenfeld-Wil-Bahn mit Messung von Fahr- und Haltezeiten statt. Gleichzeitig wurde der Anteil von genutztem Halt auf Verlangen erhoben. Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen zunächst die rein bahnbetrieblichen Werte. Abbildung 31 stellt der Anzahl verkehrender Kurse die gemittelten kumulierten Viertelstundenleistungen der drei Gleichrichter gegenüber.

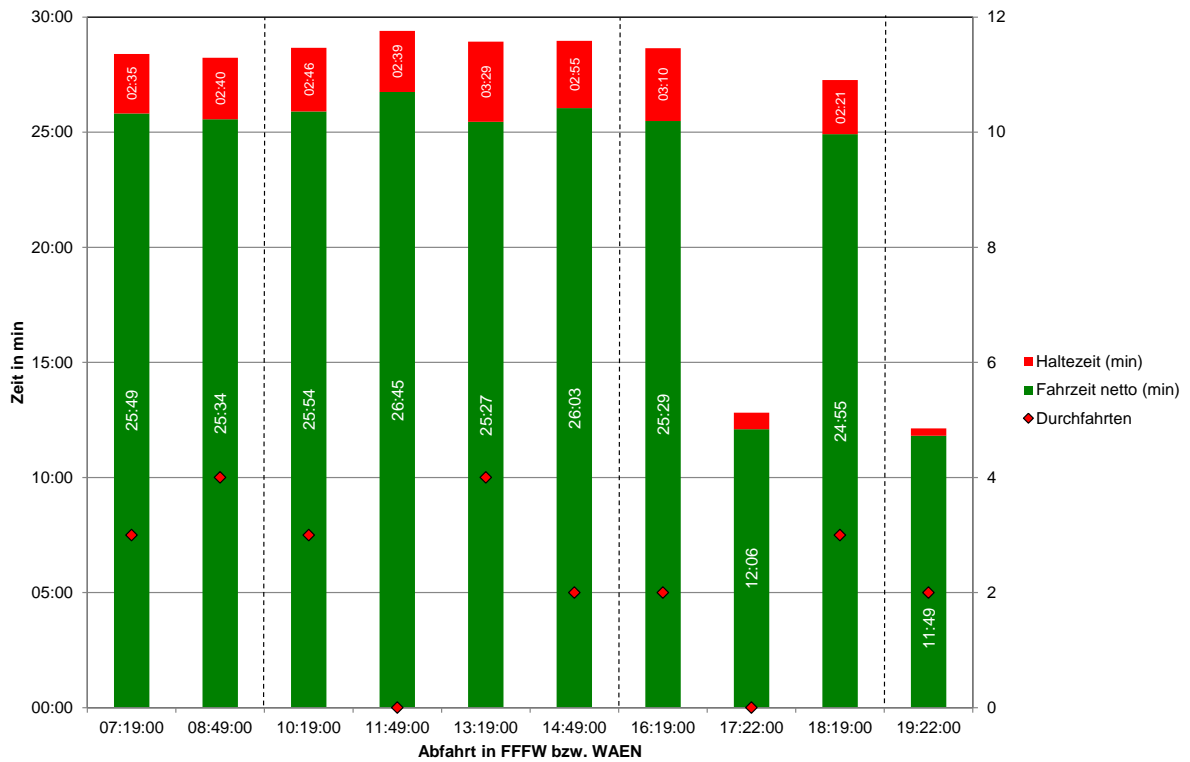


Abbildung 29: Fahrzeit netto (grün), Haltezeit (rot) und Durchfahrten bei Halt auf Verlangen (rot, Sekundärachse) in Richtung Wil am 07.03.2017

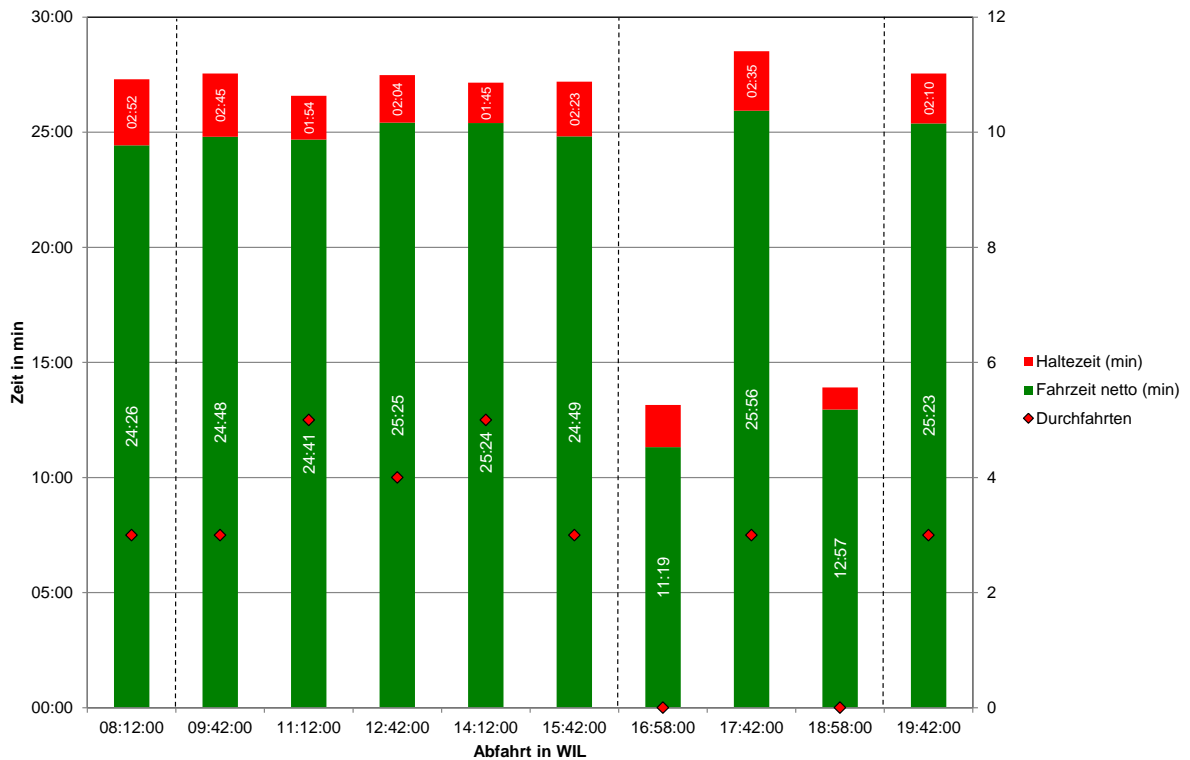


Abbildung 30: Fahrzeit netto (grün), Haltezeit (rot) und Durchfahrten bei Halt auf Verlangen (rot, Sekundärachse) aus Richtung Wil am 07.03.2017

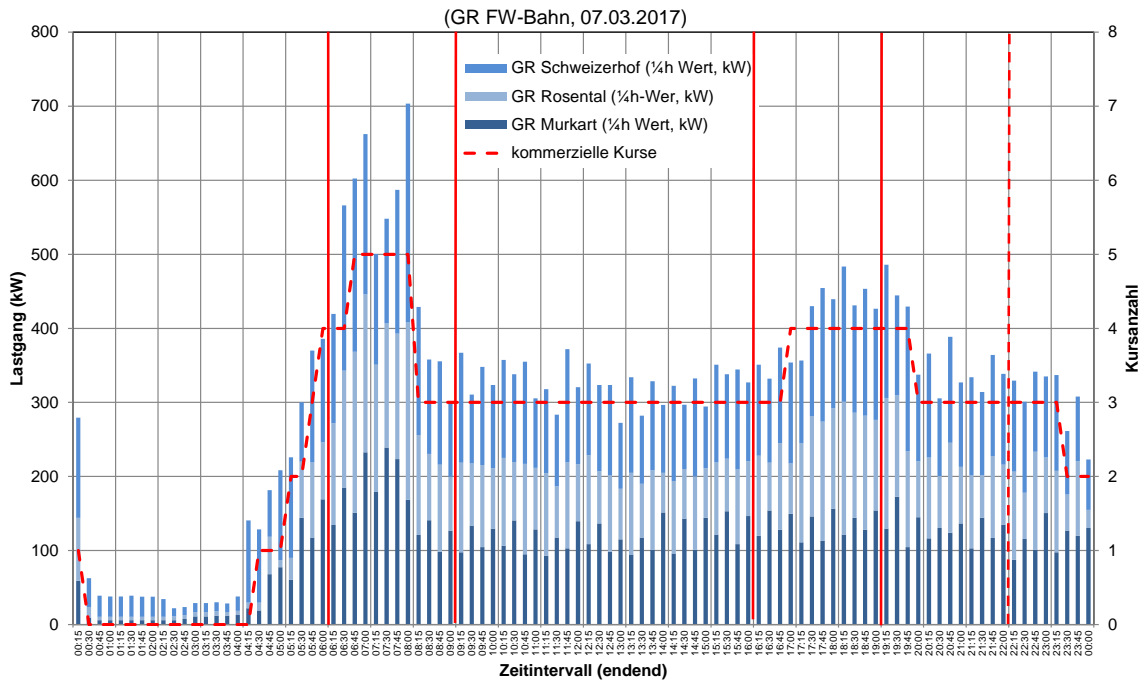


Abbildung 31: Lastgang der FW-Bahn mit Anzahl kommerzieller Kurse unterteilt in Verkehrszeiten (07.03.2017)

Die Sensibilisierung der Triebfahrzeugführer für ihren Einfluss auf eine energieeffiziente Bahnproduktion ist eine wichtige Voraussetzung zur Steigerung der Energieeffizienz. Es stiftet daher ökologischen wie ökonomischen Mehrwert, diesen Aspekt in die jährliche Lokführerschulung einzubeziehen. Daraus wird für die Appenzeller Bahnen (hier ohne Anteil der FW-Bahn) als konservative Abschätzung eine jährliche Energieeinsparung von rund 250 MWh erwartet.

Dispositions- und Fahrempfehlungssystem

Energieeffizienz in der Bahnproduktion erfordert ein enges Zusammenspiel zwischen Disposition und Operation [10]. Neben der thematisierten Lokführerschulung stellt ein geeignetes Dispositions- bzw. Fahrempfehlungssystem einen wesentlichen Erfolgsfaktor hierfür dar. Dies bezieht sich insbesondere auf die Optimierung von Konflikten wie Zugkreuzungen auf eingleisigen Strecken unter Einbezug der Betriebslage und den Abbau von Verfrühungen bei geringerer Endkundennachfrage. Ein leicht verspätet verkehrender Zug kann daher leicht in eine energieeffiziente Fahrt des kreuzenden Zuges übersetzt werden, ohne die Betriebsstabilität zu gefährden. Erfahrungen mit vernetzten Fahrempfehlungs- bzw. Dispositionssystemen anderer Bahnen lassen für die Appenzeller Bahnen eine jährliche Energieeinsparung von weiteren rund 370 MWh erwarten.

5. Diskussion

Die Dreiteiligkeit aus der Analyse und Quantifizierung der Energieflüsse, der Identifikation wichtiger Einflussfaktoren auf den Energiebedarf und der Ableitung geeigneter Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz ist geeignet, das System elektrische Bahn – konkret die Appenzeller Bahnen – nach Potenzialen der Energieeffizienz systematisch zu analysieren. Dieses Vorgehen wurde bereits in einer früheren Studie für SBB Cargo [11] erfolgreich angewendet.

Die Betrachtung der Energieflüsse richtet sich hierbei nach der Granularität der konsolidierten Zählerwerte. Es ist dabei aus fachlicher Sicht nur teilweise möglich, die Vollständigkeit und Plausibilität der bereitgestellten Daten zu prüfen. Diesem Risiko wurde mit der Analyse zweier vollständiger Jahresgänge 2014 und 2015 begegnet. Der Gesamtumfang der umgesetzten und somit analysierten Energie beträgt rund 15 GWh jährlich.

Die Identifikation der Einflussgrössen auf den traktionsseitigen und stationären Energiebedarf dient primär der Aufbereitung und Visualisierung der komplexen Zusammenhänge im System Bahn. Im Sinne der Übersichtlichkeit erfolgt eine Fokussierung auf die jeweils energetische Hauptwirkung. Die komplexen Wechselwirkungen gehen somit darüber hinaus, was jedoch den Rahmen und Kontext dieser Studie sprengen würde. Dem Ziel der energetischen Verortung der nachfolgend zu identifizierenden Massnahmen wird sie gerecht.

Die Identifikation von Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bei den Appenzeller Bahnen strukturiert sich nach den Ansatzpunkten Angebot, Technik (Traktion und stationär) sowie Bahnproduktion. Konkrete Anhaltspunkte bieten die Erfahrungen und Stossrichtungen von SBB Energie aus dem Energiesparprogramm in diesen Themenfeldern, welche jedoch auf die Spezialitäten eines überwiegend mit Gleichstrom betriebenen Bahnnetzes zu kalibrieren sind. Das Vorschlagen von Massnahmen erfordert zudem die Triage aus dem energetisch Wünschenswerten (hohe Energiemenge), dem ökonomisch Machbaren (geringe Implementierungskosten) und dem terminlich Sinnvollen (zeitnahe und kurze Implementierung). Insbesondere letztgenannter Aspekt erfordert die fundierte Analyse der mittel- und langfristigen Planungen der Appenzeller Bahnen.

Eine weitere Herausforderung sind die vergleichsweise tiefen Energiepreise, beispielsweise von 10.3 Rappen pro Kilowattstunde elektrischer Energie. Die Appenzeller Bahnen gelten beim Energieeinkauf bereits als Grossverbraucher. Daraufhin sind Massnahmen, deren Realisierung grössere Investitionen auslösen, schwerer darstellbar. Einen Ausweg bietet die Nutzung von Opportunitäten aus der aktuellen Bahnmodernisierung, woraufhin konzeptionelle Anpassungen im Fahrzeugpark, dem Gleisnetz und der Bahnenergieversorgung möglich werden.

Von besonderem Interesse sind in diesem Kontext alle planerischen Anpassungen im (langfristigen) Angebot, da diese Energieeffizienz ermöglichen, jedoch Grenzkosten nahe null aufweisen. Anspruchsvoller sind grössere technische Änderungen wie das traktionstechnische Umbauen bestehender Fahrzeuge, was entsprechend nicht ins Massnahmenportfolio aufgenommen wurde. Ebenso anspruchsvoll sind energetische Massnahmen mit grosser Anlagenanzahl wie den stationären Gebäudeheizungen. Auch im Kontext von Denkmal- und Heimatschutz steht dieser energetisch an sich interessante Optimierung einer grossen Heterogenität und Anzahl zu optimierender Anlagen gegenüber. Kleinstmassnahmen wie z. B. der Verzicht auf den Fahrradwagen der Strecke Altstätten Stadt – Gais während weiterer vier Wochen pro Jahr sind angesichts der Energiewirkung auf dem kurzen Streckenabschnitt (ca. 52 MWh/a) und der eher negativen Endkundenwirkung zunächst nicht priorisiert.

Soll das Verhältnis aus monetärer und technischer Energiewirkung in Form der Paybackzeit analysiert werden, fallen die planerischen Anpassungen (z. B. Geschwindigkeitsspitzen) mit Payback <1 Jahr besonders positiv auf. Massnahmen in der Bahnproduktion (z. B. Fahrempfehlungssystem/DAS auf Basis der Betriebslage) lassen eine Paybackzeit von <5 Jahren erwarten. Technische Massnahmen (z. B. Anpassung Speisekonzept) liegen deutlich darüber (> 10 Jahre), sind erst bei ohnehin erforderlichen konzeptionellen Anpassungen (z. B. Leistungsausbau) realisierbar und dennoch über den verbleibenden Lebenszyklus (z. B. 40 Jahre für Gleichrichter) wirtschaftlich.

Die identifizierten Massnahmen haben somit deutlich unterschiedliche Umsetzungshorizonte. Im Zuge der aktuellen Modernisierungsprojekte (Durchmesserlinie St. Gallen, Fahrzeugbeschaffung etc.) wird der Massnahmenfächer aus Opportunitäten breiter als erwartet. Weitere Optimierungen wie der Einbezug der Energieeffizienzthematik in die Lokführerschulung sind dafür bereits innerhalb von wenigen Monaten realistisch.

Insgesamt werden 14 Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz der Appenzeller Bahnen inklusive der Frauenfeld-Wil-Bahn abgeleitet und näher vorgestellt. Der Gesamtumfang dieser Massnahmen beträgt rund 2.8 GWh, was rund 18 % vom Gesamtenergiebedarf AB (bzw. 16 % vom Energiebedarf AB mit FW) entspricht und weitestgehend kumulierbar ist. Für die Auswahl der sechs bevorzugten Massnahmen wurde insbesondere die erwartete Energieeinsparung herangezogen und an bereits laufenden beziehungsweise absehbaren Massnahmen gespiegelt. Die energetische und finanzielle Massnahmenquantifizierung erfolgte im Zweifelsfall konservativ, um ein Überschätzen der zweifelsfrei vorhandenen energetischen wie finanziellen Energieeffizienzvorteile zu vermeiden.

Durch den positiven Einfluss der Energieeffizienzmassnahmen auf die Senkung der Betriebskosten wird ein Interesse an der konkreten Umsetzung dieser Massnahmen erwartet.

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Steigerung der Energieeffizienz ist Anspruch und wichtige Aufgabe bei der aktuell laufenden Bahnmodernisierung. Vor diesem Hintergrund wurden die Appenzeller Bahnen im vorliegenden Energiekonzept energetisch analysiert. Hierfür wurde das dreiteilige Vorgehen aus Quantifizierung der Energieflüsse, Identifikation der Einflussgrössen auf den Energiebedarf und Ableitung geeigneter Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz gewählt. Tabelle 8 gibt einen Überblick über das erarbeitete Massnahmenportfolio.

Ressource	System	Massnahmenart	Massnahmenbeispiel	Energie (kWh/a)	Energiewirkung (CHF/a)
Angebot	Liniennetz	Taktanpassung ausserhalb HVZ	FW-Verstärker (18:58 / 19:22) mit Fluchtfahrten	15500	1597
		Geschwindigkeitsprofile	Glättung Geschwindigkeitsprofile	191900	19766
	Transportgefässeinsatz	Anpassung Fahr- und Reservezeitverteilung	Fahrzeitverteilung vor Kreuzungen und Endpunkten	191900	19766
		Ausdehnung von Halt auf Verlangen	Waldstatt, Weissbad // Teufen, Bühler	15200	1566
		Anpassung Transportgefässeinsatz NVZ	Module gemäss Flottenkonzept	563800	58071
Technik Traktion	Traktionsbedarf	IGBT-Fahrzeuge mit Antrieboptimierung	Neufahrzeuge GAW (5) und DML (11)	372000	38316
	Hilfsbetriebe	bedarfsabhängige Hilfsbetriebebesteuerung			
	Komfortbetriebe	Abstellung, energieoptimierte Komfortbetriebe			
Technik stationär	Bahnergieversorgung	Speisekonzept	nachregulierbare rückspeisefähige Gleichrichter	506000	52118
		Spannungserhöhung	Anpassung TB auf 1.5 kV	62000	6386
	Weichenheizung Gebäudeheizung	Optimierung Weichenheizungsbetrieb	automatische Weichenheizung	243000	25029
		energetische Gebäudesanierung	-	-	-
Bahnproduktion	Fahrweise (Operation)	LF-Schulung	jährliche Lokführerschulung mit Energieeffizienzmodul	248000	25544
	Dispositionssystem	Fahrempfehlungssystem	DAS auf Basis Betriebslageinformation	372000	38316
				2781300	286474

Tabelle 8: Massnahmenportfolio im Energiekonzept AB

Von den insgesamt 14 Massnahmen werden sechs Massnahmen mit einer Energiewirkung von 2.8 GWh/a und einer Energiekostenwirkung von 0.3 Mio. CHF/a für die Umsetzung vorgeschlagen, wobei für drei Massnahmen bereits konkrete Pläne zur Umsetzung bestehen.

Massnahmen zur bevorzugten Umsetzung (in Summe 1.1 GWh/a / 7.2 % Einsparung)

- Angebot: Glättung Geschwindigkeitsprofile
- Technik: Speisekonzept mit nachregulierbaren, rückspeisefähigen Gleichrichtern
- Bahnproduktion: Fahrempfehlungssystem auf Basis der Betriebslageinformation

Massnahmen in bereits konkreter Planung (in Summe 1.0 GWh/a / 6.6 % Einsparung)

- Angebot: Transportgefässeinsatz gemäss Modulkonzept
- Technik: neues Rollmaterial mit vergrößerter Energieeffizienz
- Technik: Spannungserhöhung Trogener Bahn

Die sechs priorisierten Massnahmen sind aus den systematischen Analysen der Appenzeller Bahnen abgeleitet. Sie erschliessen einen wesentlichen Teil des aufgezeigten Energieeinsparpotenzials und bewirken jährlich wiederkehrend sinkende Energiekosten.

Literaturverzeichnis

- [1] Aeberhard, Martin und Schranil, Steffen: Elektrische Bahnen – einfach spannend, Vorlesung für Gdl Know[s] How, Bern, 11/2016
- [2] Grandjean, Nicolas und Chrétien, Rémy: Energieeffizienz bei ÖV-Unternehmen, Projekt 002, BAV-Studie im Rahmen von ESöV 2050, Bern, 2014
- [3] Köhler, Martin: Energieoptimaler Triebfahrzeugeinsatz im Personenverkehr, Diplomarbeit TU Dresden, 02/2015
- [4] Meyer, Markus und Lerjen, Markus: Energieeffizienzperspektiven SBB 2015 – 2030, emkamatik-Projektbericht, Wettingen, 12/2009
- [5] Schranil, Steffen: Die Herausforderung einer hohen Netzauslastung und die Lösungsansätze bei der SBB, Vorlesung im Kolloquium Verkehrsmanagement, TU Dresden, 06/2016
- [6] Schranil, Steffen: Methodik zum energetischen Wirkungsnachweis der Adaptiven Zuglenkung ADL, ETG-Fachtagung, Spiez, 06/2015
- [7] Schranil, Steffen: Energieeffizienz bei den SBB, Electrosuisse-Bulletin, 03/2017, Seite 28 – 35
- [8] Schranil, Steffen und Anders, Natalia: Energieeffizienz in der strategischen Angebotsplanung der SBB, Elektrische Bahnen, 03/2017, Seite 100 – 105
- [9] Schranil, Steffen: Optimierung der Ausrüstung und Steuerung von Triebzügen im Hinblick auf minimalen Energieverbrauch, Diplomarbeit TU Dresden, 08/2009
- [10] Schranil, Steffen und Grossenbacher, Peter: Energieeffizienz in der Bahnproduktion, Eisenbahntechnische Rundschau, 09/2017, Seite 152 – 157
- [11] Schranil, Steffen / Stadler Benz, Philippe et al: Energiecheckup SBB Cargo, Bern, 2015
- [12] Stephan, Arnd et al: Energieoptimaler Bahnverkehr, VDE-Studie, Dresden/München, 2014