



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)

054 REKUPARATION FAHRSTROM AB / WECHSELRICHTER BAVARIA

Schlussbericht

Michael Schönenberger, m.schoenenberger@appenzellerbahnen.ch

Appenzeller Bahnen AG, St. Gallerstrasse 53, 9102 Herisau, www.appenzellerbahnen.ch

Begleitgruppe

-

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

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

CH-3003 Bern

Programmleiter

Stany Rochat, BAV

Projektnummer: 054

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.

Herisau, 25.11.2024

Inhalt

Executive Summary in Deutsch	4
Executive Summary in Französisch	5
Executive Summary in Englisch	6
Zusammenfassung in Deutsch	7
1. Ausgangslage	11
2. Ziel der Arbeit	11
3. Projektansatz und aktueller Wissensstand	11
4. Ergebnisse	12
4.1 Technische Lösung	12
4.2 Resultate	17
5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	20
6. Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	21
7. Literaturverzeichnis	21

Abbildungen

Abbildung 1: TB-Streckenabschnitt Spisertor – Trogen	7
Abbildung 2: Höhenprofil der Strecke Spisertor – Trogen	7
Abbildung 3: Prinzipschema Wechselrichter (Bild Simatex AG)	12
Abbildung 4: Raumdisposition Bavaria (Bild Eltrend GmbH)	13
Abbildung 5 & 6: Aufbau Wechselrichter (Ansicht Simatex AG, Foto Appenzeller Bahnen AG)	14
Abbildung 7: Prinzipschema DC-Einspeise-Feld (Bild Simatex AG)	14
Abbildung 8: Prinzipschema Stromrichter-Feld (Bild Simatex AG)	15
Abbildung 9: Prinzipschema Stromrichter-Feld (Bild Simatex AG)	16
Abbildung 10: Rückspeiseenergie im Zeitraum Anfang Februar 2022 bis Ende Mai 2022	17
Abbildung 11: Rückspeiseenergie im Zeitraum Anfang Juli 2022 bis Ende März 2023	18
Abbildung 12: Rückspeiseenergie Jahr 2023	18

Tabellen

Tabelle 1 Energiebilanz TB 2023	18
Tabelle 2 Grober Vergleich der Grundlagedaten aus der Energiestudie mit der heutigen Realität	19

Executive Summary in Deutsch

Ausgangslage:

Die Realisierung des Projekts «Durchmesserlinie St. Gallen» der Appenzeller Bahnen AG erforderte die Spannungsumstellung der Strecke Spisertor bis Trogen von 1'000VDC auf 1'500VDC. Die Einführung eines Wechselrichters zur Rückspeisung von Bremsenergie wurde aufgrund eines erwarteten Energieeinsparungspotenzials von 650-750MWh/Jahr beschlossen.

Ziel der Arbeit:

Die überschüssige Bremsenergie aus der Rekuperation wird mit einem Wechselrichter ins Mittelspannungsnetz zurück gespeist.

Projektansatz und aktueller Wissensstand:

Eine technische Lösung wurde entwickelt, um einen Wechselrichter in einer bestehenden Anlage mit begrenzten Platzverhältnissen zu integrieren.

Ergebnisse:

- Technische Lösung: Ein 12-pulsiger Umrichter wurde in IGBT-Technik realisiert, um Bremsenergie zurück ins Mittelspannungsnetz zu speisen.
- Der Wechselrichter Bavaria ist voll funktionsfähig und normkonform umgesetzt.
- Energiebetrachtung: Im Zeitraum vom 1. Juni 2020 bis 31. Dezember 2023 wurden insgesamt 1'200MWh elektrische Energie zurück ins Mittelspannungsnetz gespeist, wobei im «optimierten» Jahr 2023 allein 484MWh erreicht wurden. Dies entspricht 65% der ursprünglichen, jährlichen Prognose gem. vorangegangener Energiestudie [2]. Die geringere Energieausbeute ist basierend auf den getroffenen Annahmen für die Energiestudien weitgehend erklärbar.
- Die Amortisationszeit der Gesamtinvestition beträgt, unter Annahme einer jährlichen Energierückspeisemenge von 484MWh (Referenzjahr 2023) und einem vergüteten Energiepreis von gegenwärtig 11Rp./kWh, etwa 11 Jahre.
- Das Projekt «Wechselrichter Bavaria» zeigt den Fortschritt in Richtung einer nachhaltigeren Bahntechnologie und zeigt das Engagement der Appenzeller Bahnen AG für umweltfreundliche Lösungen im öffentlichen Verkehr.

Das Projekt «Wechselrichter Bavaria» konnte erfolgreich umgesetzt werden und trägt zur Effizienzsteigerung im öffentlichen Verkehr bei.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen:

Wechselrichterprojekte erfordern eine enge Zusammenarbeit zwischen den Verantwortlichen für die Traktionsstromversorgung und das Rollmaterial, insbesondere bei der Festlegung des Spannungsfensters für die Rekuperation zwischen Leerlaufspannung der Traktionsversorgung und der maximal zulässigen Fahrleitungsspannung. Die Herausforderung besteht darin, dieses Rekuperationsfenster so zu definieren, dass die Stabilität des Traktionssystems gewährleistet bleibt und gleichzeitig das Potenzial zur Rekuperation maximiert werden kann.

Bei der Beschaffung neuen Rollmaterials ist es dringend zu empfehlen, die spannungssystemspezifischen, oberen Grenzen gemäss EN 50163 sowie die P/U-Kennlinie der Fahrzeuge für die Betriebszustände «Fahren» und «rekuperativ Bremsen» als Anforderung im Pflichtenheft zu benennen.

Executive Summary en français

Contexte :

La réalisation du projet «Durchmesserlinie St. Gallen» des Appenzeller Bahnen AG a nécessité le passage de la tension de la ligne de chemin de fer entre Spisertor et Trogen de 1'000VCC à 1'500VCC. L'introduction d'un onduleur pour la récupération de l'énergie de freinage a été décidée en raison d'un potentiel d'économie d'énergie attendu de 650 à 750 MWh par an.

Objectif du travail :

L'énergie de freinage excédentaire provenant de la récupération est réinjectée dans le réseau moyenne tension par un onduleur.

Approche du projet et état des connaissances actuel :

Une solution technique a été développée pour intégrer un onduleur dans des installations existantes avec un espace limité.

Résultats :

- Solution technique : un onduleur 12 pulses a été réalisé avec la technologie IGBT pour renvoyer l'énergie de freinage dans le réseau de moyenne tension.
- L'onduleur est fonctionnel et mis en œuvre conformément aux normes.
- Analyse énergétique : du 1er juin 2020 au 31 décembre 2023, un total de 1'200 MWh d'énergie électrique a été renvoyé dans le réseau moyenne tension, dont 484 MWh en 2023, l'année « optimisée ». Cela correspond à 65 % de l'estimation annuelle initiale selon une étude énergétique antérieure au projet. La différence s'explique en grande partie par une divergence des hypothèses formulées dans l'étude énergétique.
- Temps de retour sur investissement : en supposant une restitution annuelle de 484 MWh (année de référence 2023) et un tarif de rémunération de l'énergie de 0,11 CHF/kWh, le temps de retour sur investissement des coûts totaux est d'environ 11 ans.
- Le projet « Onduleur Bavaria » montre les progrès réalisés vers une technologie ferroviaire plus durable et témoigne de l'engagement des Appenzeller Bahnen AG en faveur de solutions écologiques dans les transports publics.

Le projet a été mis en œuvre avec succès et contribue à améliorer l'efficacité dans les transports publics.

Conclusions et recommandations :

Les projets d'onduleurs nécessitent une étroite collaboration entre les responsables de l'alimentation en courant de traction et ceux du matériel roulant, notamment lors de la définition de la plage de tension pour la récupération d'énergie, entre la tension à vide de l'alimentation en énergie de traction et la tension de ligne maximale autorisée. Le défi consiste à définir cette fenêtre de récupération de manière à garantir la stabilité du système de traction tout en maximisant le potentiel de récupération d'énergie.

Lors de l'acquisition de nouveau matériel roulant, il est vivement recommandé de spécifier dans le cahier des charges les limites supérieures du système de tension selon la norme EN 50163, ainsi que la courbe caractéristique P/U des véhicules pour les modes « traction » et « freinage régénératif ».

Executive Summary in English

Background:

The realization of the «Durchmesserlinie St. Gallen» project by the Appenzeller Bahnen AG required the voltage conversion of the railway line Spisertor to Trogen from 1,000VDC to 1500VDC. The introduction of an inverter for regenerative braking was decided upon due to an expected energy saving potential of 650-750MWh/year.

Objective of the work:

The excess braking energy from recuperation is fed back into the medium-voltage grid by an inverter.

Project approach and current state of knowledge:

A technical solution was developed to integrate an inverter into existing installations with limited space.

Results:

- Technical solution: A 12-pulse inverter was implemented using IGBT technology to feed braking energy back into the medium-voltage grid.
- The Bavaria inverter is fully operational and complies with the relevant standards.
- Energy Analysis: From June 1, 2020, to December 31, 2023, a total of 1,200 MWh of electrical energy was fed back into the medium-voltage grid, with 484 MWh achieved in the "optimized" year of 2023 alone. This corresponds to 65% of the original annual forecast according to a previous energy study. The lower energy yield is largely explained by the assumptions made in the energy study. [2]
- The payback period for the entire investment is, assuming an annual energy recovery amount of 484MWh (reference year 2023) and a reimbursed energy price of currently 11 cents/kWh, around 11 years.

The «Wechselrichter Bavaria» project demonstrates progress towards more sustainable rail technology and reflects Appenzeller Bahnen AG's commitment to eco-friendly solutions in public transport. The project was successfully implemented and contributes to improving efficiency in public transport.

Conclusions and recommendations:

Inverter projects require close cooperation between those responsible for traction power supply and rolling stock, particularly when defining the voltage window for energy recovery between the no-load voltage of the traction power supply and the maximum allowable voltage of the overhead lines. The challenge is to define this recovery window in a way that ensures the stability of the traction system while maximizing the energy recovery potential.

When acquiring new rolling stock, it is highly recommended to specify the upper voltage system limits according to EN 50163 and the P/U characteristic curve of the vehicles for both "driving" and "regenerative braking" modes as requirements in the specifications document.

Zusammenfassung in Deutsch

Der vorliegende Bericht behandelt die Implementierung des Projekts «Wechselrichter Bavaria» der Appenzeller Bahnen AG. Ziel des Projekts war es, die überschüssigen Rekuperationsenergie der bremsenden Züge zurück in das öffentliche Mittelspannungsnetz zu speisen und damit die Energieeffizienz zu verbessern.

Die Traktionsspannung der Strecke Spisertor - Trogen wurde im Zuge des Projektes «Durchmesserlinie St. Gallen» von 1'000VDC auf 1'500VDC umgestellt. Im Zusammenhang mit dieser Spannungs-umstellung und der Neubeschaffung rekuperationsfähiger Schienenfahrzeuge wurde das Energierück-gewinnungspotential an den verschiedenen Gleichrichterstandorten entlang der Strecke für die Instal-lation eines Energiespeichers oder Wechselrichters untersucht. Die Integration eines Wechselrichters in die bestehenden Gleichrichterstation Bavaria, am Fusse eines längeren Gefälles, wurde aufgrund der Energiestudien als Bestlösung ausgewählt.

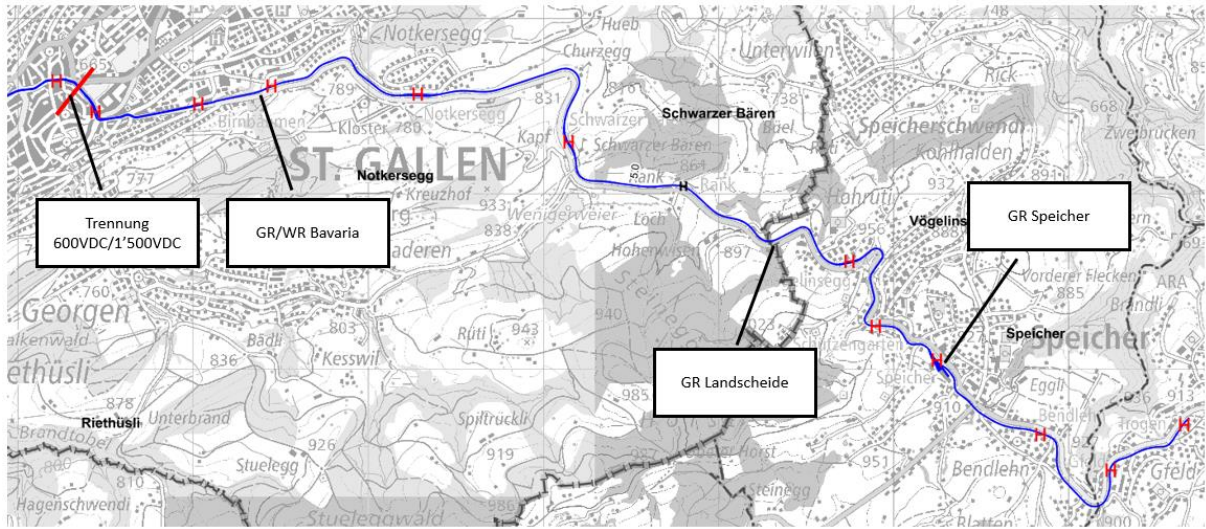


Abbildung 1: TB-Streckenabschnitt Spisertor – Trogen

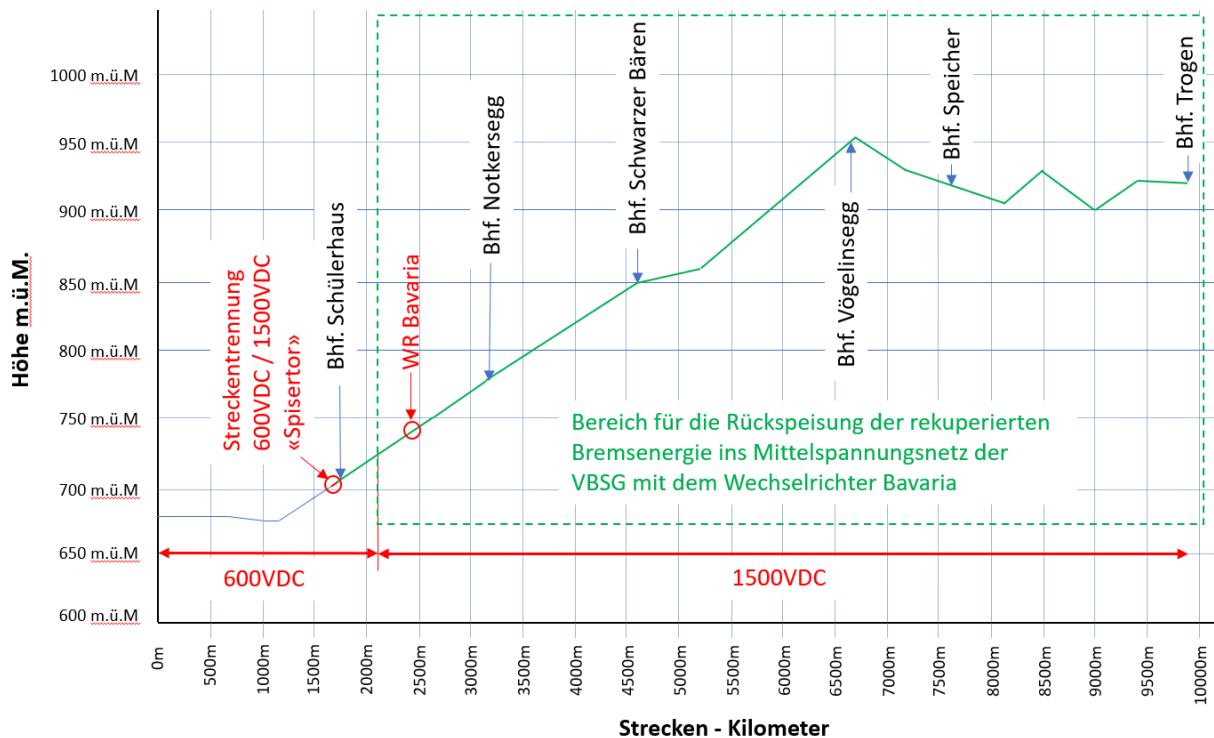


Abbildung 2: Höhenprofil der Strecke Spisertor – Trogen

Der Bericht beschreibt den Aufbau der Wechselrichteranlage mit den zugehörigen Anpassungen an der bestehenden Gleichrichteranlage. Besondere Herausforderungen gab es aufgrund der engen räumlichen Platzverhältnisse und der betrieblichen Anforderung, den laufenden Betrieb der Gleichrichteranlagen während der Installation des Wechselrichters nur für kurze Zeit zu unterbrechen.

Während des Probetriebs wurde festgestellt, dass die Rückspeisung der Bremsenergie zwar funktionierte, die rekuperierte Energiemenge jedoch bei weitem nicht den Erwartungen aus der vorangegangenen Studie entsprach. Ausschlaggebend dafür waren vor allem eine zugunsten der Rekuperation nicht optimierte, fahrzeugseitige Einstellung der P/U-Kennlinie, sowie einzelne noch nicht optimale Einstellungen am Wechselrichter. Der verfügbare Spannungshub für die Rekuperation der Fahrzeuge war stark limitiert. Die Optimierungen ergaben schliesslich eine signifikante Steigerung der rückgespeisten Energiemenge ins Mittelspannungsnetz.

Die Wirtschaftlichkeit des Projekts hängt insbesondere von der rückgespeisten Bremsenergiemenge und dem dafür vergüteten Strompreis ab. Das im Vergleich zur vorangehenden Studie etwas geringer ausfallende Rückspeisepotential an Bremsenergie wird aktuell durch eine höhere Energievergütung ausgeglichen. Die Amortisationszeit der Wechselrichteranlage beläuft sich heute auf ungefähr 11 Jahre.

Das Wechselrichterprojekt erfordert eine enge Abstimmung zwischen den Verantwortlichen für die Traktionsstromversorgung und das Rollmaterial. Entscheidend dabei ist die Festlegung des Spannungsfensters für die Rekuperation, das zwischen der Leerlaufspannung der Traktionsversorgung und der maximal zulässigen Fahrleitungsspannung liegt. Bei der Beschaffung von neuem Rollmaterial sind die spannungssystembedingten Grenzen nach EN 50163, sowie die gewünschte P/U-Kennlinie der Fahrzeuge als Anforderung zu definieren. Seitens der Traktionsstromversorgung ist insbesondere das durchgehende Leerlaufspannungslevel im Detail zu überprüfen.

«Früher» lagen die Leerlaufspannungen aufgrund des einzigen Ziels einer stabilen Traktionsstromversorgung eher am oberen Ende des zulässigen Spannungsbereichs, da keine rekuperierenden Fahrzeuge im Netz waren.

Mit der Einführung rekuperierender Fahrzeuge entstand das neue Bedürfnis die Leerlaufspannung zu senken, um einen grösseren Spannungshub zugunsten der Rekuperation zur Verfügung zu stellen. Die Herausforderung besteht darin, ein optimales Rekuperationsfenster zu definieren, welches einerseits die Stabilität des Traktionsstromsystems sichert und gleichzeitig das grösstmögliche Potenzial zur Rekuperation ausschöpft.

Das Projekt «Wechselrichter Bavaria» steht für ein, im Sinne der Nachhaltigkeit, gelungenes Beispiel für die erfolgreiche Rückgewinnung von Bremsenergie im öffentlichen Verkehr.

Résumé en français

Le présent rapport porte sur la mise en œuvre du « Wechselrichter Bavaria » des Appenzeller Bahnen AG. L'objectif du projet était de réinjecter l'énergie excédentaire de récupération des trains au freinage dans le réseau moyenne tension et d'améliorer ainsi l'efficacité énergétique du système.

La tension de traction de la ligne Spisertor - Trogen a été modifiée de 1000VCC à 1500VCC dans le cadre du projet « Durchmesserlinie St. Gallen ». Dans le cadre de ce changement de tension et de l'acquisition de nouveaux véhicules ferroviaires capables de récupérer l'énergie de freinage, le potentiel de récupération d'énergie aux différents emplacements des sous-stations le long du tracé pour l'installation d'un système de stockage d'énergie ou d'un onduleur a été étudié. L'intégration d'un onduleur dans la sous-station de redressement existante de Bavaria, dans la zone d'une pente plus longue, a été choisie comme la meilleure solution sur la base des études énergétiques faites en amont du projet.

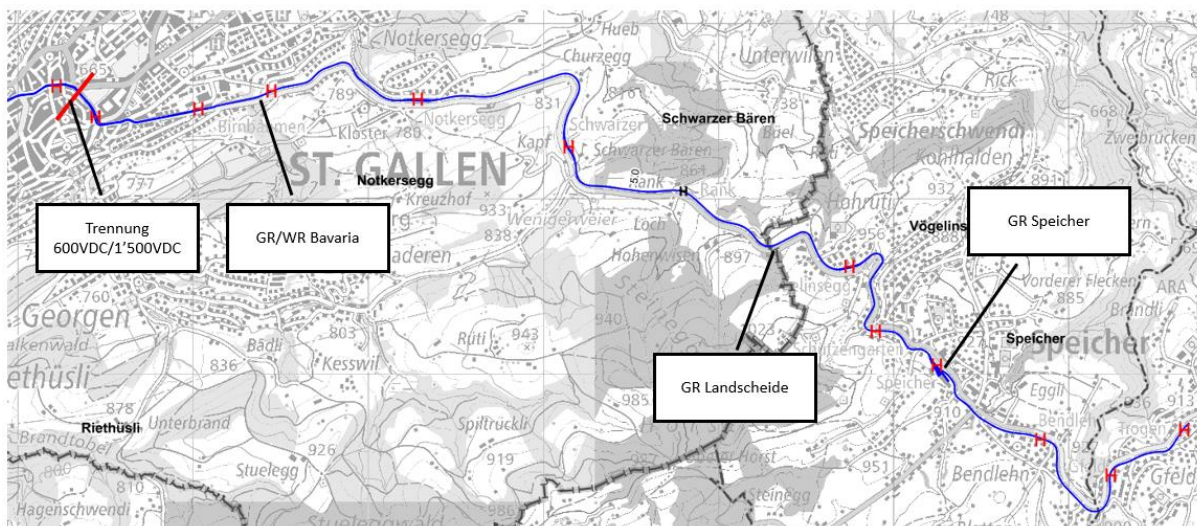


Abbildung 1: Aperçu de la section de ligne entre Spisertor et Trogen

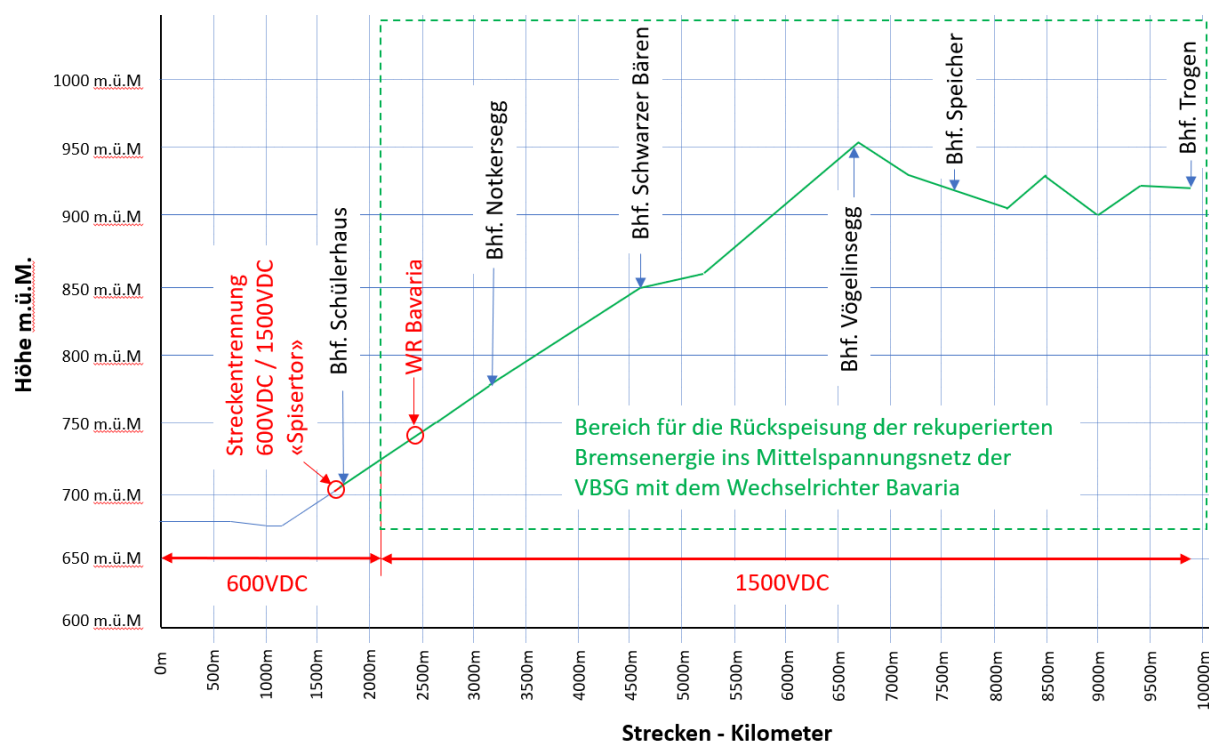


Abbildung 2: Profil en long de la section Spisertor – Trogen

Le rapport décrit la structure du système d'onduleur avec les ajustements effectués au système de redressement existant. Il y avait des défis particuliers en raison de l'espace disponible limité et de la nécessité opérationnelle de minimiser la période d'interruption de l'alimentation en énergie de traction.

Durant la mise en service, il a été constaté que bien que la réinjection fonctionne, la quantité d'énergie récupérée ne répondait de loin pas aux pronostiques établis sur la base des études théoriques. Cela s'explique principalement par un réglage non optimisé de la courbe caractéristique puissance-tension du matériel roulant en faveur de la récupération, ainsi que par des réglages individuels sur l'onduleur qui n'étaient pas encore optimaux. La plage de tension pour la récupération d'énergie du véhicule disponible était très limitée. Les optimisations ont finalement permis d'augmenter considérablement la quantité d'énergie réinjectée dans le réseau moyenne tension.

La viabilité économique du projet dépend principalement de la quantité d'énergie de freinage restituée et du prix de l'électricité rémunéré pour celle-ci. Par rapport aux études théoriques, la quantité d'énergie réinjectée plus faible est actuellement compensée par une rémunération énergétique plus élevée. La période d'amortissement du système d'onduleur est d'environ 11 ans.

Le projet d'onduleur nécessite une coordination étroite entre les responsables de l'alimentation en courant de traction et ceux du matériel roulant. L'élément clé est la définition de la fenêtre de tension pour la récupération d'énergie, qui se situe entre la tension à vide de l'alimentation en traction et la tension de ligne maximale autorisée. Lors de l'acquisition de nouveau matériel roulant, il convient de définir les limites liées au système de tension selon la norme EN 50163, ainsi que la courbe caractéristique puissance-tension des véhicules comme exigences. Du côté de l'alimentation en traction, il est particulièrement important de vérifier le niveau de tension à vide.

Avant l'optimisation énergétique, les tensions à vide étaient plutôt situées à l'extrémité supérieure de la plage de tension autorisée, avec pour unique objectif de garantir une alimentation stable en courant de traction, puisque aucun véhicule récupérateur d'énergie n'était présent sur le réseau.

Avec l'introduction de véhicules récupérateurs, un nouveau besoin est apparu : celui de réduire la tension à vide afin de permettre une plage de tension plus grande pour la récupération d'énergie. Le défi consiste à définir une fenêtre de récupération optimale qui, d'une part, assure la stabilité du système d'alimentation en traction et, d'autre part, maximise le potentiel de récupération d'énergie.

En termes de durabilité, le projet « Wechselrichter Bavaria » est un exemple réussi de récupération de l'énergie de freinage dans les transports publics.

1. Ausgangslage

Im Rahmen der Realisierung des Projekts „Durchmesserlinie St. Gallen“ der Appenzeller Bahnen AG musste die Strecke Spisertor - Trogen von 1'000VDC auf 1'500VDC umgestellt werden. Dazu wurden bereits 2012 die Gleichrichteranlagen an den bestehenden Standorten ersetzt und mit umschaltbaren Transformatoren ausgestattet. Aufgrund der beabsichtigten Beschaffung einer modernen, rekuperationsfähigen Zugsflotte traten geeignete Lösungen zur Rückspeisung der überschüssigen Bremsenergie in das vorgelagerte Mittelspannungsnetzes oder die Speicherung dieser Energie in einem geeigneten Medium in den Fokus und wurden vertieft untersucht.

Der Entscheid zugunsten eines Wechselrichters am Standort der Gleichrichteranlage Bavaria erfolgte basierend auf einem jährlichen Energierückgewinnungspotential von ca. 650 [1]-750 [2] MWh. Als Grundlagen dieser Studie dienten neben der bekannten Netztopologie die damals angenommenen Fahrzeugdaten, zusammen mit einem noch nicht definitiven Fahrplan.

Für eine kostengünstige und betrieblich, verträglichen Umsetzung wurden die folgenden Anforderungen definiert:

- Realisierung innerhalb des bestehenden Baukörpers der Gleichrichterstation Bavaria
- Beibehaltung möglichst vieler bestehender Anlagenteile
- Weiterbetrieb der bestehenden Gleichrichteranlage muss bei einem Ausfall des Wechselrichters ohne betriebliche Einschränkungen möglich sein.
- Für die Installationsarbeiten vor Ort wurde aus betrieblichen Verfügbarkeitsgründen eine Freischaltung der Gleichrichteranlage von maximal zwei Wochen gewährt.

2. Ziel der Arbeit

Mit dem Projekt Wechselrichter Bavaria wurden folgende Meilensteine und Ziele verfolgt:

- Entwicklung / Realisierung / Probetrieb / Optimierung und finaler Betrieb des Wechselrichters
- Nachweis Energierückspeisepotentials der vorangegangenen Energiestudie
- Zeitgerechte Amortisation und wirtschaftlicher Betrieb des Wechselrichters

3. Projektansatz und aktueller Wissensstand

Am Markt sind Wechselrichtersysteme verschiedener Anbieter verfügbar. Diese Systeme sind in der Regel als Beistellanlagen zu konventionellen Gleichrichteranlagen mit einem separaten Transformator für den Stromrichter konzipiert. Solche Wechselrichtersysteme beanspruchen aufgrund ihrer Bauweise ähnlich viel Platz wie eine komplette Gleichrichteranlage mit zwei Leistungsschalterfeldern.

Die Nachrüstung solcher Wechselrichtersysteme in bestehende Gleichrichterstationen ist deshalb in vielen Fällen nicht oder höchstens im Rahmen eines Totalersatzes der gesamten Gleichrichterstation realisierbar.

Im vorliegenden Fall musste aus Platzgründen auf einen separaten Wechselrichtertrafo verzichtet werden. Das führte dazu, dass die Spannungsanpassung am Eingang des Wechselrichterteils mit zusätzlichen Drosseln auszurüsten war und ergänzende Massnahmen zur Verhinderung von Kreisströmen getroffen werden mussten. Im Vergleich zu einer «Standardlösung» hat dieser Ausbaustandard Nachteile, da er die Wechselrichteranlage komplexer macht und zu etwas höheren Leistungsverlusten führt, bedingt durch die zusätzlichen Drosseln im Leistungskreis.

Mit dem Projekt «Wechselrichter Bavaria» wurde eine technische Lösung entwickelt, welche die Nachrüstung des Wechselrichters in einer bestehenden Gleichrichteranlage mit beschränkten Platzverhältnissen ermöglicht.

4. Ergebnisse

4.1 Technische Lösung

4.1.1 Prinzipieller Aufbau

Der prinzipielle Aufbau der Gleichrichterstation mit dem Wechselrichter wurde wie folgt realisiert:

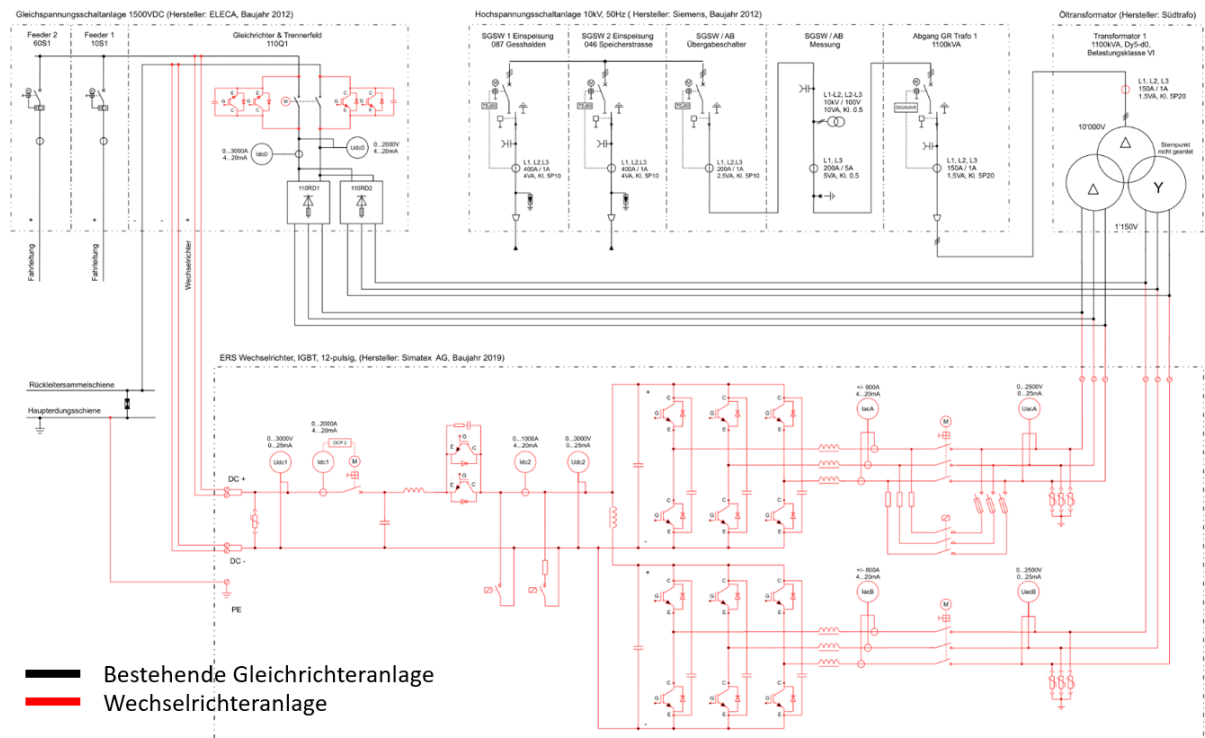


Abbildung 3 Prinzipschema Wechselrichter (Bild Simatex AG)

Der Anschluss des Wechselrichters erfolgte DC-seitig direkt an der Sammelschiene des bestehenden Gleichrichters. AC-seitig erfolgte der Anschluss an den sekundärseitigen Anzapfungen des Gleichrichtertransformators.

4.1.2 Anpassung des bestehenden Anlagenlayouts

Im Rahmen der Projektierung, Ausschreibung und Realisierung des Projekts wurde grossen Wert darauf gelegt, dieses Projekt ohne umfangreiche und kostspielige Anpassungen der bestehenden Gleichrichteranlage und des technischen Raumes umzusetzen. Die Gleichrichteranlage wurde erst im Jahr 2012 totalsaniert und dabei alle technischen Einrichtungen und Anlagenteile ersetzt. Grössere Anpassungen oder tiefere Eingriffe in die Anlage waren aus wirtschaftlicher Sicht nicht vertretbar.

Für die Nachrüstung der Gleichrichteranlage mit einem Wechselrichter musste die bestehende Niederspannungsverteilung im Raum an einen neuen Standort verschoben und die entsprechende Verkabelung angepasst werden. Die Nachrüstung des Wechselrichters verlangte folgendes Raumlayout.

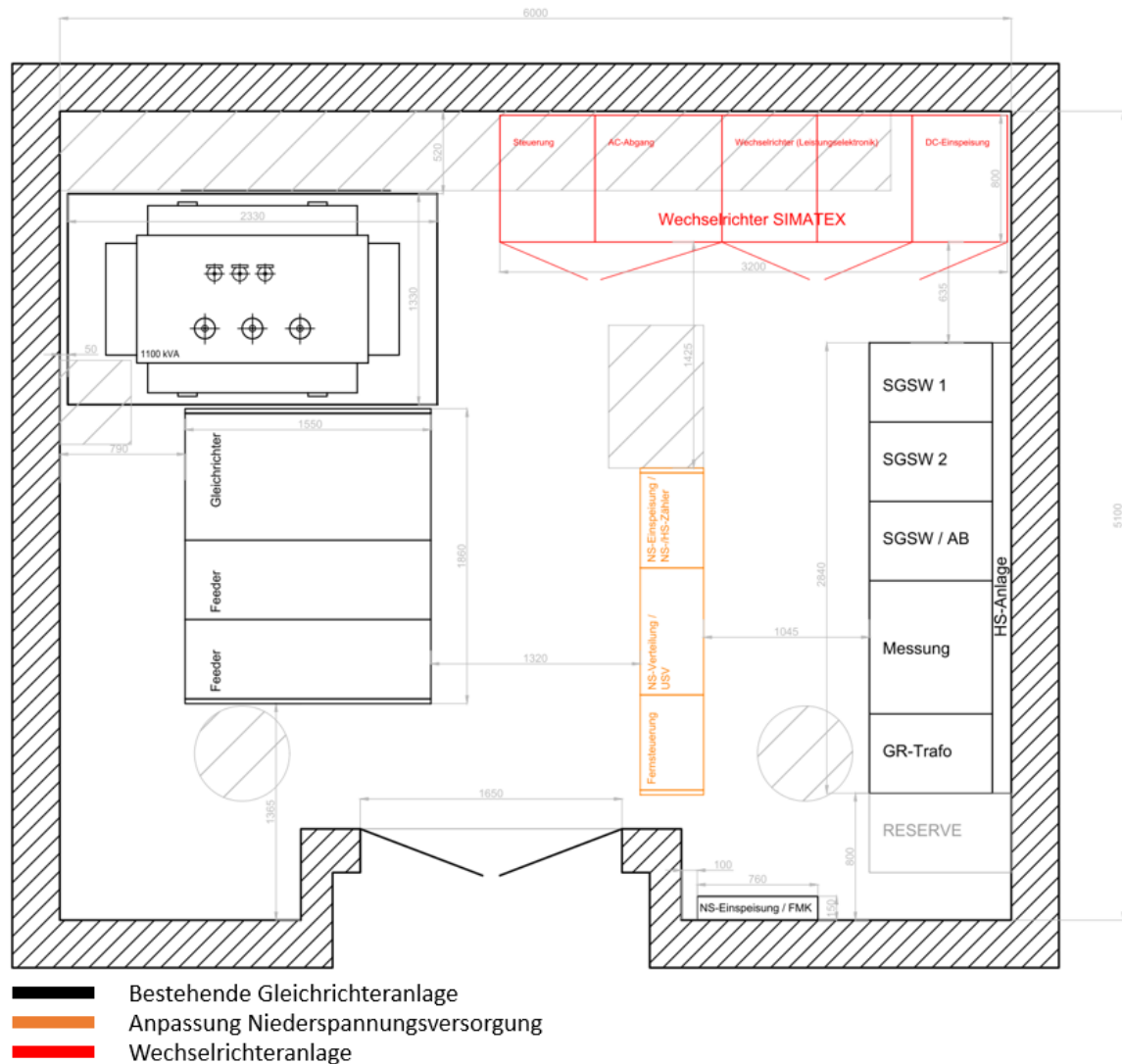


Abbildung 4: Raumdisposition Bavaria (Bild Eltrend GmbH)

Wie aus dem Layout ersichtlich, sind die räumlichen Verhältnisse sehr knapp bemessen. Mit der gewählten Anordnung der Anlagen konnten alle Vorschriften und Vorgaben in Bezug auf Fluchtwege und Bedienungsgänge der Anlagen eingehalten werden.

Die Gleichrichterzelle wurde mit folgenden Komponenten erweitert:

- DC-Anschluss für den Wechselrichter an der Sammelschiene
- Einbau IGBT-Module parallel zum 2-poligen Trenner zwischen Gleichrichter und der Sammelschiene zur Unterdrückung von Kreisströmen

In der bestehenden Niederspannungsverteilung wurden die Abgänge für die Hilfsspeisungen des Wechselrichters nachgerüstet, sowie die Datenpunkte der Fernwirkanlage zum Anschluss der Überwachung des Wechselrichters erweitert.

Mit dem Wechselrichterbetrieb erhöhte sich die Wärmeverlustleistung in der Gleichrichterstation, was die Nachrüstung einer Zwangslüftung erforderte. Auf eine Klimaanlage konnte verzichtet werden.

4.1.3 Wechselrichter

4.1.3.1 Aufbau der Anlage

Der Wechselrichter ist als 12-pulsiger Umrichter in IGBT-Technik realisiert. Der Aufbau des Wechselrichters erfolgte in Reihenschaltschränken, die sich in folgende Funktionseinheiten unterteilen:

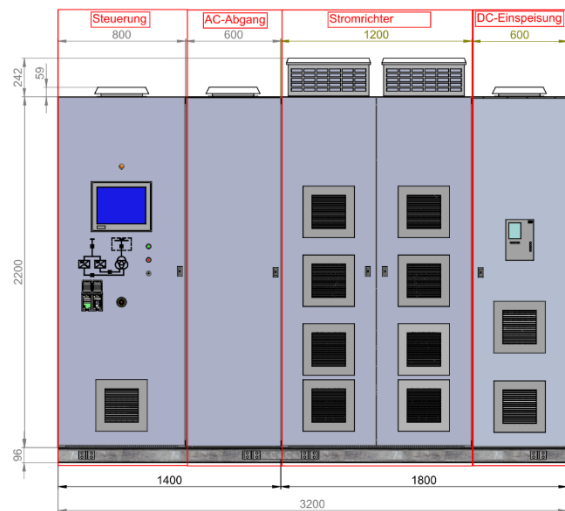


Abbildung 5 & 6: Aufbau Wechselrichter (Ansicht Simatex AG, Foto Appenzeller Bahnen AG)

4.1.3.2 DC-Einspeisung

Im DC-Einspeise-Feld sind im Wesentlichen folgende Komponenten verbaut:

- DC-Leistungsschalter
- DC-Schutzgerät / Strommessung
- Hochsetzsteller
- Kurzschlusschütz DC-Zwischenkreis
- Entladeschütz DC-Zwischenkreis
- Strom- und Spannungsmessung DC-Zwischenkreis

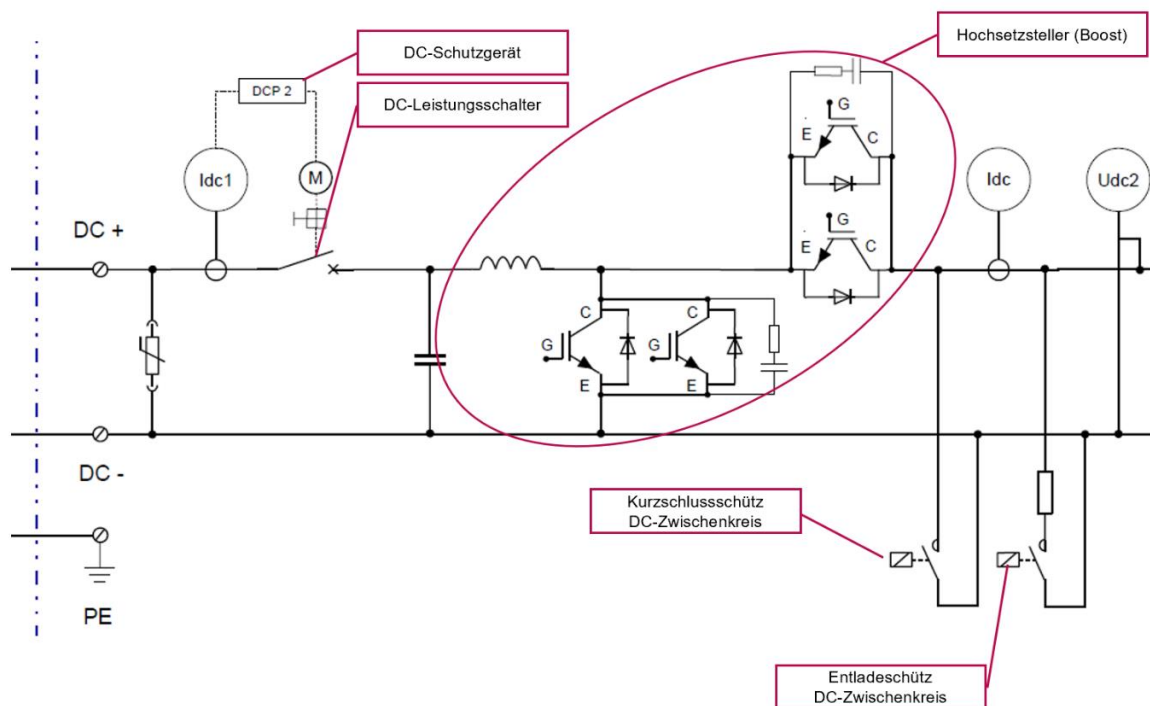


Abbildung 4: Prinzipschema DC-Einspeise-Feld (Bild Simatex AG)

Mit dem DC-Leistungsschalter und dem DC-Schutzgerät wird ein von der Wechselrichtersteuerung unabhängiges Schutzsystem an der Systemschnittstelle zwischen Gleichrichteranlage und Wechselrichter realisiert.

Der Hochsetzsteller kann zur Anhebung der Zwischenkreisspannung vor dem Stromrichter verwendet werden. Im Rahmen der ersten Tests wurde erkannt, dass die Verwendung des Hochsetzstellers keinen erheblichen Zugewinn an Rückspeiseenergie bewirkt und der Hochsetzsteller wurde deaktiviert. Die Freilaufdioden der IGBT's welche längs der Sammelschiene des Plus-Pols eingebaut sind, wirken als Schutzdioden um den Rückfluss von Energie aus dem Wechselrichter auf die Sammelschiene des Gleichrichters zu verhindern (siehe Abbildung 3).

Mit dem Entlade- und Kurzschlusschutz des DC-Zwischenkreises wird der Zwischenkreis bei einem Not-Stopp der Anlage oder bei Arbeiten in der Anlage sicher entladen und definiert kurzgeschlossen.

4.1.3.3 Wechselrichter

Der Wechselrichter ist 12-pulsig mit zwei parallel geschalteten 6-pulsigen Brücken und einer Saugdrossel zwischen den beiden IGBT-Brücken aufgebaut.

Im Wechselrichter-Feld sind im Wesentlichen folgende Komponenten verbaut:

- Zwischenkreis-Kondensatoren
- Saugdrossel
- IGBT mit integrierter Freilaufdiode und Ansteuermodul
- Halbleiter-Schutzkondensatoren
- Filterdrosseln am Ausgang des Stromrichters

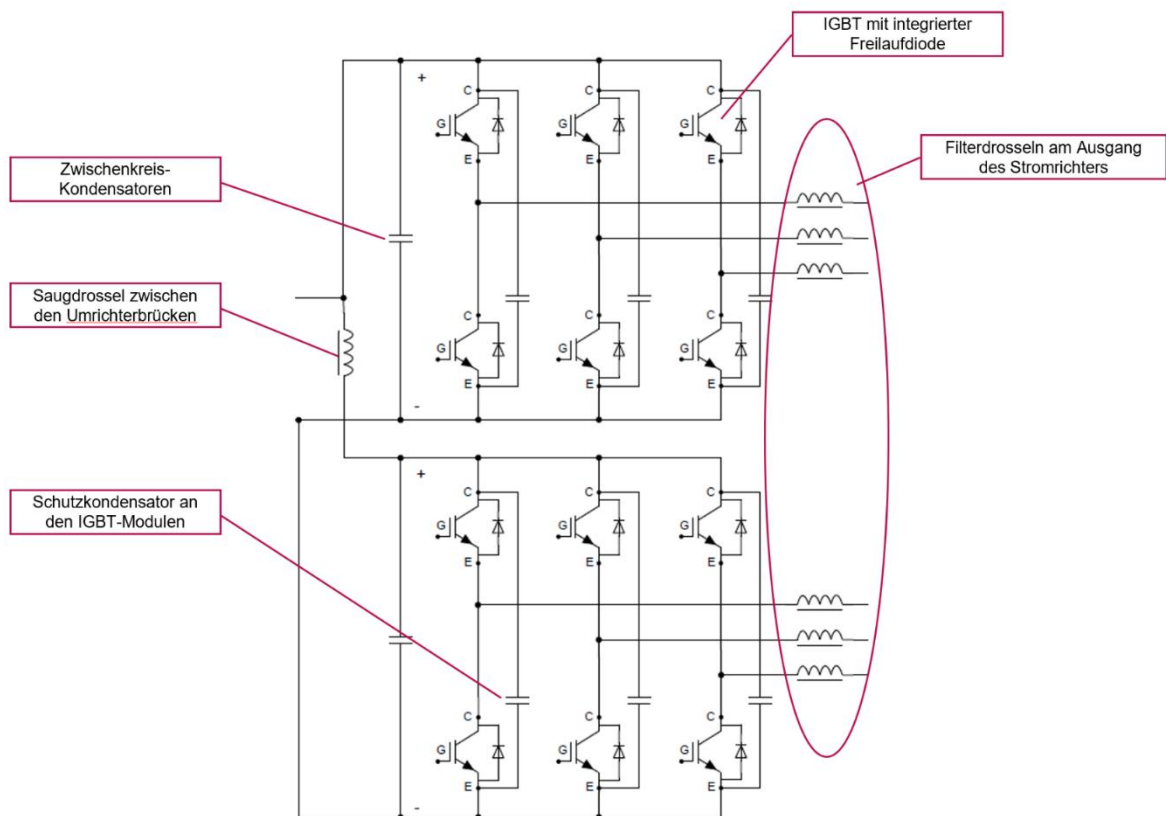


Abbildung 5: Prinzipschema Stromrichter-Feld (Bild Simatex AG)

Die Kühlung der Halbleiter erfolgt mittels direkt an die IGBT-module angeflanschten Ventilatoren (forcierte Lüftung).

4.1.3.4 AC-Abgang

Im AC-Abgangs-Feld sind im Wesentlichen folgende Komponenten verbaut:

- AC-Leistungsschalter (2 Stück)
- Vorladung DC-Zwischenkreis
- Überspannungsableiter

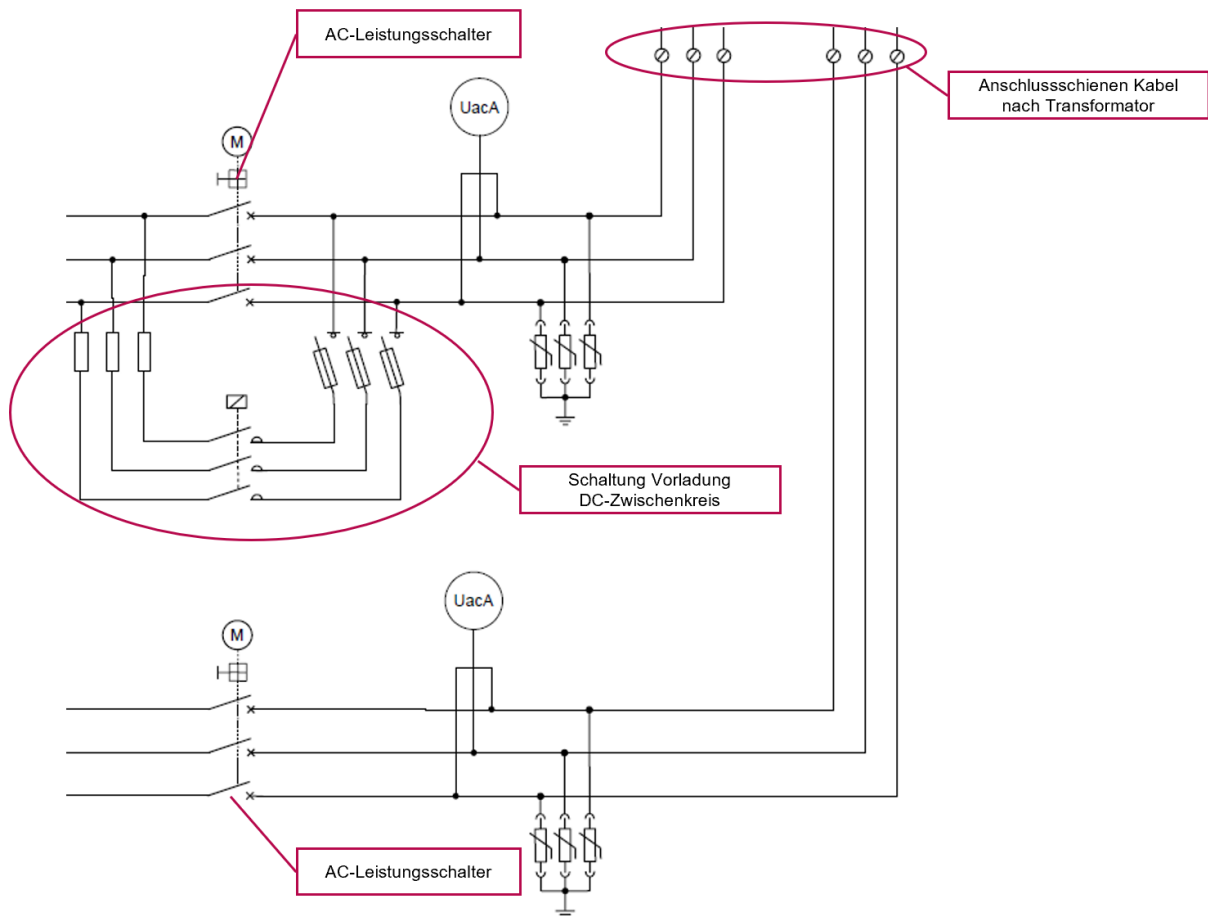


Abbildung 6: Prinzipschema Stromrichter-Feld (Bild Simatex AG)

Die beiden AC-Leistungsschalter dienen zur Schutzabschaltung und Trennung der AC-seitigen Leistungsabgänge vom Transformator.

Mit der Vorladung wird der DC-Zwischenkreis über die Freilaufdioden der IGBT's einer 6-Puls-Brücke auf ein definiertes Spannungsniveau vorgeladen.

4.1.3.5 Steuerung

Im Steuerungsfeld sind die Energieversorgung der Hilfsspannungen, sowie die gesamte Steuerung der Anlage untergebracht.

Die Steuerung der Anlage läuft auf einer handelsüblichen IPC-Steuerungseinheit.

Nach der Vorladung des internen Zwischenkreises und der Schliessung der Leistungsschalter am DC-Eingang und an den beiden AC-Ausgängen befindet sich der Wechselrichter im Standby-Status. Dabei ist die Steuerung auch permanent mit dem Mittelspannungsnetz durch Erfassung und Auswertung des Netzsinus synchronisiert.

Durch den Bremsvorgang der Bahn wird das Spannungsniveau der Fahrleitung als Funktion der tatsächlichen Bremsenergie angehoben. Mit einer schnellen Messung, basierend auf dem Hall-Effekt Prinzip, wird die Traktionsspannung in Echtzeit erfasst. Sobald ein parametrierbarer Sollwert überschritten wird, ändert der Wechselrichter vom Standby- in den Rückspeise-Betrieb. Wenn nach der Rekuperation die Spannung wieder unter einen, ebenfalls parametrierbaren Wert sinkt, wechselt dieser wieder zurück in den Standby-Modus.

Im Rückspeisebetrieb wird die Bremsenergie in das Mittelspannungsnetz eingespeist. Der Regelalgorithmus wurde speziell für diese Anwendungen entwickelt. Er basiert auf dem Prinzip der Vektorregelung. Die Spannungen und Ströme am Wechselrichter AC-Abgang werden erfasst, gefiltert und mittels d/q-Transformation in ein zweiachsiges Koordinatensystem überführt.

Die Regelung hat direkten Einfluss auf die Pulsweitenmodulation der IGBT-Schalter und hat als Sollwert einen parametrierbaren Leistungsfaktor ($\cos\phi$) als Referenz. Die Blindleistung und die Wirkleistung werden mit der generierten Wechselrichter-Ausgangsspannung, durch Anpassung der Amplitude sowie des Phasenwinkels geregelt.

Parallel zum motorisierten Trenner in der Gleichrichteranlage sind IGBT-Schnellschalter ergänzt worden, welche nur im Rekuperationsbetrieb geöffnet werden. Damit können Kreisströme zwischen Gleichrichter und Wechselrichter ausgeschlossen werden, bzw. wird sichergestellt, dass einzig rekuperierte Bremsenergie ins Mittelspannungsnetz zurückfließt.

Der IPC dient, zusammen mit den schnellen Messsystemen, nicht nur der Regelung, sondern übernimmt auch Schutzfunktionen. Überspannungen und Überströme werden innerhalb von 3 ms erkannt, ausgewertet und die IGBT durch eine Pulssperre abgeschaltet.

Der Wechselrichter verfügt über eine forcierte Luftkühlung. Die Radialventilatoren der einzelnen Module, wie auch die Schranklüftung, wird temperatur- und bedarfsabhängig geregelt. Der Eigenverbrauch und die Schallemissionen werden damit minimiert.

Zur Steuerung und Überwachung der Anlage steht lokal ein Touch-Panel mit eigener Visualisierung zur Verfügung. Auf einem Übersichtsbild werden die Status vom Wechselrichter, von Schaltern und alle aktuellen Messwerte angezeigt.

Ein Fernzugriff über das Netzwerk der Appenzeller Bahnen AG ermöglicht die Überwachung der Anlage. Am Netzübergabepunkt ist ein zertifiziertes Netz-Monitoring und Analysegerät installiert welches permanent die Netzqualität nach den gültigen Normen überwacht.

4.2 Resultate

4.2.1 Allgemein

Der eigentliche Probebetrieb der Anlage startete am 01. Juni 2020.

Nach einigen Monaten Probebetrieb wurde festgestellt, dass die Ausbeute der Energierückspeisung nicht den Erwartungen der vorangegangenen Energiestudie entsprach. Das Hauptproblem wurde bei der energietechnisch suboptimalen Einstellung der PU-Kennlinie auf den Fahrzeugen gefunden.

Bis Anfang April 2022 konnte die PU-Kennlinie der gesamten Fahrzeugflotte neu eingestellt, bzw. optimiert werden. Der Spannungshub für die Rekuperation wurde dabei um ca. 100 V erhöht und das Rekuperationsfenster für die Energierückspeisung damit erheblich vergrößert. Diese Anpassungen resultierten in einer ungefähr 10% grösseren Rückführung der Rekuperationsenergie.

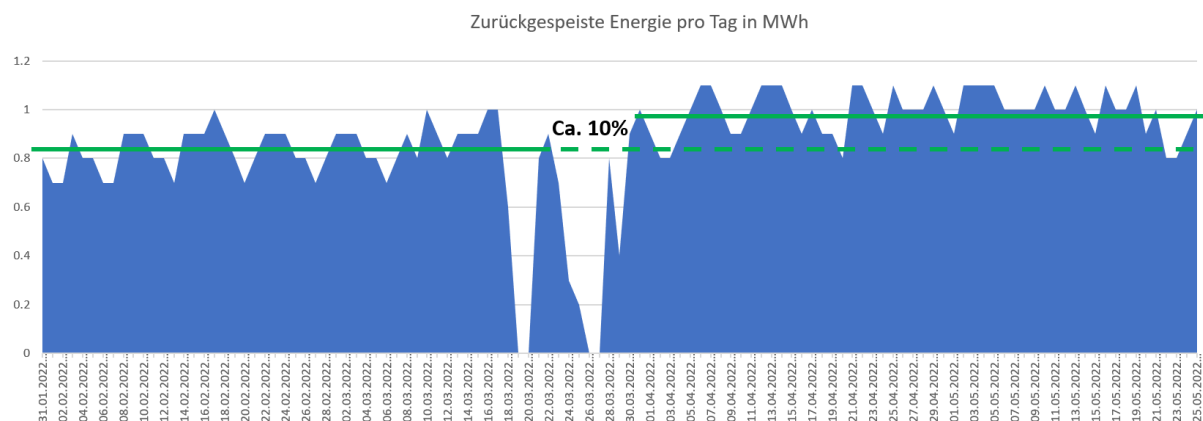


Abbildung 7: Rückspeiseenergie im Zeitraum Anfang Februar 2022 bis Ende Mai 2022

Im August 2022 wurde ein IGBT bei einem Blitzschlag beschädigt. Gleichzeitig mit der Reparatur der Leistungselektronik wurde die Regelkurve des Wechselrichters, aufgrund der bisher gesammelten Energiedaten unter die Lupe genommen und weiter optimiert. Alle Optimierungen zusammen brachten nochmal eine ungefähr 25%ige Erhöhung der Energierückspeisemenge gegenüber vorher, was dem folgenden Diagramm entnommen werden kann.

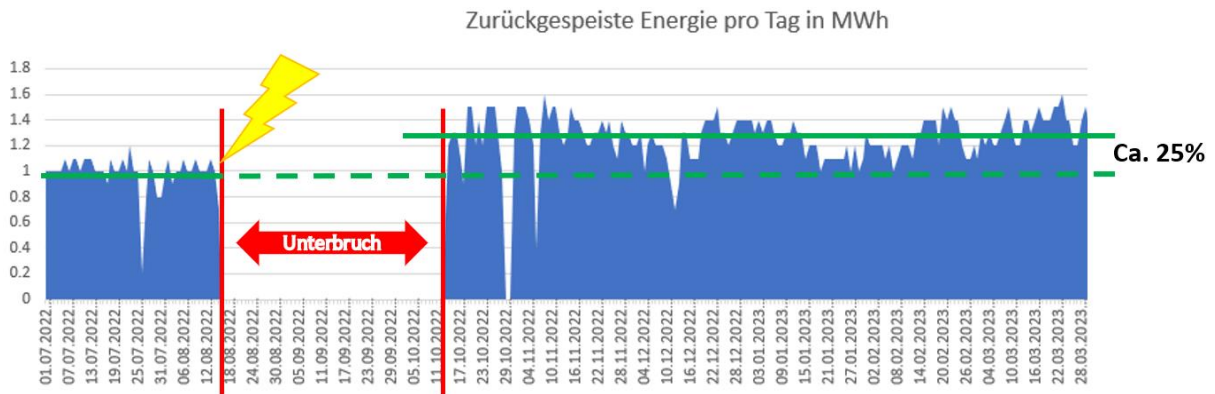


Abbildung 8: Rückspeiseenergie im Zeitraum Anfang Juli 2022 bis Ende März 2023

Im Jahr 2023 wurde, trotz zweier Betriebsunterbrüche des Wechselrichters, insgesamt 484 MWh Energie zurück ins Mittelspannungsnetz gespeist, was im nachstehenden Diagramm dargestellt ist.

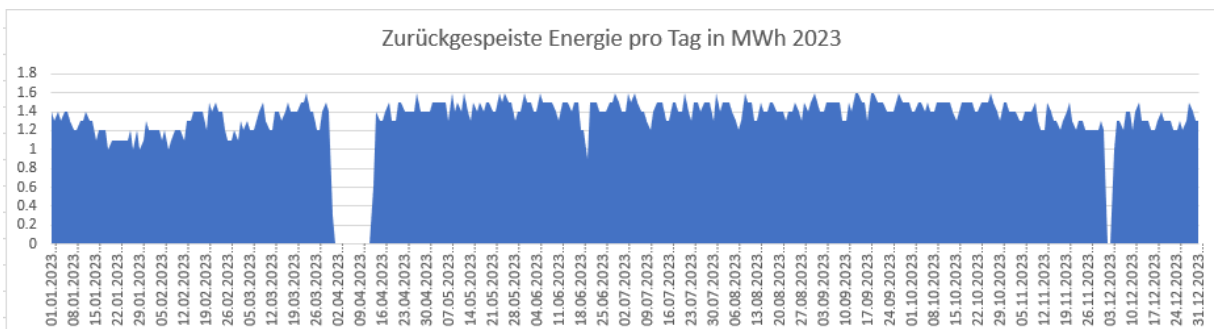


Abbildung 9: Rückspeiseenergie Jahr 2023

4.2.2 Energiebilanz Strecke Spisertor-Trogen 2023

Monat	Traktionsenergie GR	Rückspeisung Wechselrichter	Anteil Rückspeisung
Januar	244.2 MWh	-37.9 MWh	-15.52%
Februar	218.9 MWh	-35.5 MWh	-16.22%
März	235.5 MWh	-41.3 MWh	-17.54%
April	211.7 MWh	-24.7 MWh	-11.67%
Mai	217.2 MWh	-45.9 MWh	-21.13%
Juni	212.5 MWh	-43.6 MWh	-20.52%
Juli	212.8 MWh	-45.2 MWh	-21.24%
August	218.1 MWh	-44.6 MWh	-20.45%
September	210.7 MWh	-44.8 MWh	-21.26%
Oktober	217.5 MWh	-45.6 MWh	-20.97%
November	230.8 MWh	-39.9 MWh	-17.29%
Dezember	237.6 MWh	-35 MWh	-14.73%
Total	2'667.5 MWh	-484 MWh	-18.21%

Tabelle 1 Energiebilanz TB 2023

Seit der Inbetriebnahme des Wechselrichters Mitte 2020 konnten bis zum 31.12.2023 insgesamt 1'200 MWh überschüssige Bremsenergie zurück ins Mittelspannungsnetz gespeist werden.

Die Energierückspeisung ins Mittelspannungsnetz im ganzen Jahr 2023 betrug total 484 MWh. Dies entspricht 18.2% der insgesamt eingespeisten Traktionsenergie von 2'668 MWh in den Streckenast Spisertor - Trogen. Es kann davon ausgegangen werden, dass ohne die beiden Kurzausfälle des Wechselrichters im April und Dezember 2023, die Energierückspeisemarke von 500 MWh erreicht worden wäre.

Das in der vorangegangenen Studie [2] berechnete, jährliche Energierückspeisepotential von bis zu 750 MWh wurde im Vergleichsjahr 2023 nur zu ungefähr 65% erreicht.

Die geringere Energierückspeisemenge lässt sich teilweise mit der Ungenauigkeit der Grundlagedaten, erklären. Einerseits stand die neue Fahrzeugflotte noch im Entwicklungsstadium, d.h. es waren noch nicht alle massgebenden, technischen Details bekannt und andererseits entsprach der hinterlegte Fahrplan nicht dem heute gefahrenen.

Ein paar Beispiele abweichender Grundlagedaten der damaligen Energiestudie gegenüber der heutigen Realität sind in folgender Tabelle aufgelistet:

Ausgangslage / Grundlage	Energie Studie 2015	Fakten und Messungen 2023	Differenz
Jahresenergieverbrauch	3'161 MWh	2'668 MWh	Die eingespeiste Traktionsenergie liegt ca. 15% tiefer als berechnet.
Fahrplandichte	1/4h Takt während 14h mit zusätzlichen Eilzügen	1/4h Takt während 9h, keine Eilzüge	Der aktuelle Fahrplan weist ca. 20% weniger Zugverkehr auf. Der 1/4h-Takt ist noch nicht dauernd eingeführt.
Fahrzeuggewicht	Tara 77.5t Brutto 101.3t	Tara 86.2t Brutto 111.2t	Die Fahrzeuge sind effektiv ca. 10% schwerer als in der Energiestudie angenommen
Direktverbrauch von Rekuperationsenergie durch Hilfsbetriebe auf den Fahrzeugen	Annahme von ca. 90kW für Heizung und Kühlung ohne Angaben deren erwarteten Einsatzdauer	Keine Referenzdaten	Sehr grosse Wetterabhängigkeit mit entsprechender Variation in der effektiven Betriebsdauer

Tabelle 2 Grober Vergleich der Grundlagedaten aus der Energiestudie mit der heutigen Realität

Die Tabelle oben ist nicht abschliessend. Der Vergleich zwischen den angenommenen Berechnungsgrundlagen und dem heutigen Betrieb umfasst eine Vielzahl weiterer Parameter, welche in die eine oder andere Richtung wirken. Die Summe der getroffenen Annahmen während der Studienphasen, zusammen mit fehlenden Messpunkten und Datenloggern für Einzelbetrachtungen am rekuperationsfähigen Rollmaterial, lässt keine fundierteren Vergleiche oder zuverlässigere Aussagen zu den Abweichungen zu.

4.2.3 Wirtschaftlichkeit

In der Energiestudie [2] wurde von Anschaffungskosten von TCHF 450 und jährlichen Wartungskosten von TCHF 5 ausgegangen. Mit dem damals angenommenen Energiepreis von 6.5 Rappen pro Kilowattstunde und einer Rückspeisemenge von 757 MWh wären die Investitions- und Wartungskosten nach 12.6 Jahren erwirtschaftet worden.

Das Projekt Wechselrichter Bavaria hat effektive Kosten von insgesamt TCHF 537 verursacht. Die Investition wurde mit einem Beitrag von insgesamt TCHF 245 vom ESöV 2050 und der Stadt St. Gallen unterstützt.

Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Wechselrichters im Jahre 2020 wurde die zurückgespeiste Kilowattstunde mit 4.84 Rappen vergütet. Die Vergütung der Rückspeiseenergie ist in den letzten Jahren schrittweise auf gegenwärtig ca. 11 Rappen pro KWh angewachsen.

Hätte es bei einer Energierückspeisevergütung im Jahr 2020 ca. 29 Jahre gedauert, die getätigten Investitionskosten mit dem effektiv möglichen Energieertrag zu amortisieren, sind es beim aktuellen Energiepreis nur noch knapp 11 Jahre.

Aufgrund des heute massiv höheren Energiepreises, den vernachlässigbaren Unterhaltskosten und dem jährlichen Energierückspeisepotential von gegen 500MWh weist der realisierte Wechselrichter BAVARIA einen ähnlichen Amortisationszeitraum auf, wie in der vorangegangenen Studie [2] prognostiziert.

5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die beiden Projekte «Beschaffung einer rekuperationsfähigen Zugsflotte» und «Umsetzung Wechselrichter Bavaria» wurden leider weitgehend unabhängig voneinander durchgeführt. Es mangelte am Know-how bezüglich der Abhängigkeiten und damit auch am Bedürfnis einer gemeinsamen Koordination. Das beschriebene Optimierungspotential wurde im entsprechenden Umfang erst nach der Inbetriebnahme des Wechselrichters erkannt und nachträglich umgesetzt.

Aus unseren gemachten Erfahrungen lassen sich folgende Erkenntnisse und Empfehlungen ableiten:

Ein Wechselrichterprojekt muss sorgfältig zwischen der infrastrukturseitigen Traktionsstromversorgung und dem Rollmaterial abgestimmt werden. Entscheidend dabei ist die Festlegung des Spannungsfensters für die Rekuperation, das zwischen der Leerlaufspannung der Traktionsversorgung und der maximal zulässigen Fahrleitungsspannung liegt. Bei der Beschaffung von neuem Rollmaterial sind zudem die spannungssystembedingten Grenzen nach EN 50163, sowie die gewünschte P/U-Kennlinie der Fahrzeuge als Anforderung zu definieren. Seitens der Traktionsstromversorgung ist insbesondere das durchgehende Leerlaufspannungslevel im Detail zu überprüfen.

«Früher» lagen die Leerlaufspannungen aufgrund des alleinigen Ziels, eine stabile Traktionsstromversorgung bereitzustellen, eher am oberen Ende des zulässigen Spannungsbereichs. Es gab keine rekuperierenden Schienenfahrzeuge.

Mit der Einführung rekuperierender Fahrzeugflotten entsteht ein neues Bedürfnis, die Leerlaufspannung zu senken und den Spannungshub zugunsten der Rekuperation zu vergrössern. Die Herausforderung besteht nun darin, ein optimales Rekuperationsfenster zu definieren, welches einerseits die Stabilität des Traktionsstromsystems sichert und gleichzeitig das maximal mögliche Potenzial zur Rekuperation ausschöpft.

Es darf in dieser Abstimmung aber nie ausseracht gelassen werden, dass der Hauptauftrag eines Bahnunternehmens die Sicherstellung eines sicheren und zuverlässigen Bahnbetriebs ist und bleibt. Die Rückgewinnung der Bremsenergie darf kein Bahnbetriebsstörungen verursachen und muss im Gesamtsystem eine untergeordnete Priorität einnehmen.

Das Projekt Wechselrichter Bavaria wurde erfolgreich umgesetzt:

- Der Wechselrichter Bavaria ist vollkommen funktionstüchtig und nach aktueller Energietarifsituation innerhalb von 11 Jahren amortisiert.
- Die Anlage konnte trotz platzmässigen Einschränkungen normkonform realisiert werden.
- Das berechnete Potential der Energierückspeisung kann aus weitgehend erklärbaren Gründen nicht vollumfänglich ausgeschöpft werden. Der Hauptursache dafür sind unterschiedliche Parameter zwischen Studie und Realität.

Das Projekt «Wechselrichter Bavaria» trägt zur Effizienzsteigerung im öffentlichen Verkehr bei und unterstreicht die Nachhaltigkeitsbestrebungen der Appenzeller Bahnen AG.

6. Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

AB	Appenzeller Bahnen AG
AC	Wechselstrom
DC	Gleichstrom
GR	Gleichrichter
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IPC	Industrie-PC
P/U-Kennlinie	Leistungs- / Spannungskennlinie
VNB	Verteilnetzbetreiber
WR	Wechselrichter

7. Literaturverzeichnis

- [1] ECH-246.02-001.V2.0.Schlussbericht_Energiestudie_TB vom 05.08.2013
- [2] ECH-246.06-002.V1.0.Energiestudie_AB_Tango_DML vom 17.04.2015

Die Studien sind auf Anfrage bei AB erhältlich.