



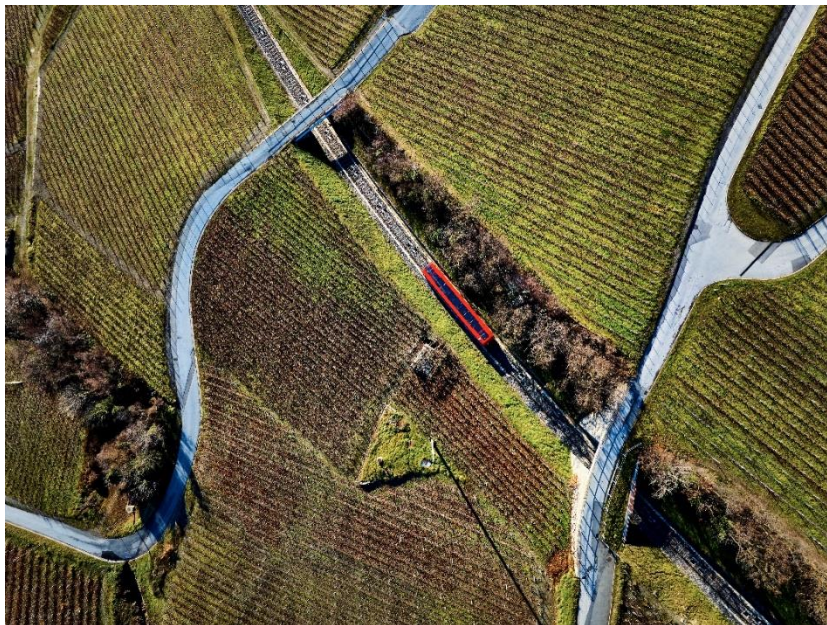
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

P-222

Energierückgewinnung, -speicherung und -management Sierre-Montana (Anlage 61.042)



Schlussbericht

Autorin / Autor 1

Frey AG Stans
Erlenwäldlistrasse 11, CH-6370 Oberdorf
Hansueli Zeller
info@freyag-stans.ch
www.freyag-stans.ch

Autorin / Autor 2

Compagnie de Chemin de Fer et d'Autobus Sierre-Montana-Crans (SMC) SA
Av. de la Gare 28, 3963 Crans-Montana 1
Patrick Cretton
patrick.cretton@cie-smc.ch
www.cie-smc.ch

Crans-Montana, den 11.11.2024

Begleitgruppe

Garaventa AG (Projekt Erneuerung Standseilbahn), Grau Patrick

Frey Stans AG (Steuerung Standseilbahn, ESFOR), Vial Julien

Technisches Dienst SMC, Rey Ludovic

OIKEN (Stromlieferant), Sierre

EFISOL SA, St-Pierre-de-Clages (Photovoltaikanlage)

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

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

CH-3003 Bern

Programmleiter

Stany Rochat, BAV

Projektnummer: 222

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

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

Bern, den 11.11.2024

Inhalt

Schlussbericht	1
Executive Summary in Deutsch	2
Executive Summary in Französisch	2
Executive Summary in Englisch	3
Zusammenfassung in Deutsch.....	3
Zusammenfassung in Französisch.....	7
1. Ausgangslage.....	11
2. Ziel der Arbeit	12
2.1 Prinzipdarstellung.....	12
2.2 Zwischenspeicherung von Energie	13
2.3 Reduktion Spitzenleistung.....	16
2.4 Räumung der Seilbahn.....	16
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand.....	17
3.1 Standard Energiespeichersystem	17
3.2 Entwicklung ESFOR.....	18
3.3 Räumung der Seilbahn ESRE.....	19
3.4 Dimensionierung ESFOR Projekt Sierre – Montana.....	21
4. Ergebnisse	22
4.1 Energiespeichersystem ESFOR	22
4.2 Energetische Analyse.....	23
4.3 15-Minuten-Leistungsspitzenwert	27
4.4 Räumung der Seilbahn.....	27
4.5 Simulation.....	28
5. Diskussion	30
5.1 Eigenverbrauchsrate	30
5.2 Allgemeiner Verbrauch.....	30
5.3 Einspeisepunkt PV-Anlage.....	30
5.4 Bremsenergie	31
5.5 Energieverbrauch und Eigendeckungsrate	31
5.6 15-Minuten-Leistungsspitzenwert	32
5.7 Räumung der Seilbahn.....	32
5.8 Grösse der PV-Anlage	32
5.9 Dimensionierung Energiespeichersystem / Projektumsetzung.....	33
6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	33
7. Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	35
8. Technische Daten der Standseilbahn	36

Executive Summary in Deutsch

Die Standseilbahn Sierre-Montana-Crans verbindet im Regionalverkehr die Orte Sierre und Crans-Montana. In dem Zeitfenster 06:00 Uhr bis 22:40 Uhr stehen den Fahrgästen 46 Fahrtenpaare zur Verfügung.

Aufgrund ihrer Besonderheiten (Länge 4'191 m, Höhenunterschied 927 m, Kapazität von 120 PAX, Motor 1'000 kW) und ihrer betrieblichen Einschränkungen (2 Umsteigestationen) weist die Anlage komplexe Betriebsparameter auf.

Parallel zur Erneuerung der Anlage im Jahr 2022 (Strecke, Bahnhöfe, Elektromechanik, Fahrzeug) wurden Überlegungen angestellt, wie die erzeugte Energie zum günstigsten Zeitpunkt durch eine direkte automatische Steuerung genutzt werden kann, um die Belastung des öffentlichen Netzes zu verringern.

Zuvor wurde die von der Anlage erzeugte Bremsenergie ohne dynamische Steuerung und ohne Mehrwert in das Netz des Anbieters zurückgespeist. Somit wurde die erzeugte Energie nicht zum effizientesten Zeitpunkt bedarfsorientiert genutzt und ermöglichte es nicht, die Leistungsspitzen und den Verbrauch zu senken.

Das innovative Energiespeichersystem «Energy Storage System For Ropeways» (ESFOR), das den Verbrauch an elektrischer Energie optimiert, wurde in den Betrieb integriert. Dieses Energiespeichersystem für Anlagen im Pendelbetrieb stützt sich auf ein leistungsstarkes Batteriesystem. Durch die Nutzung der Bremsenergie lassen sich die Stromkosten senken. Der Energiespeicher wirkt dabei als Puffer direkt im Seilbahnantrieb. So fließt beim Bremsen der Bahn die Energie in den Speicher und steht für die nächste Beschleunigung wieder zur Verfügung. Die Photovoltaikanlage mit 62 kWp auf dem Dach des Bahnhofs Crans-Montana vervollständigt das Programm. Die erzeugte Solarenergie wird in denselben Batterien gespeichert und direkt in das Energiemanagementsystem und die Steuerung der Standseilbahn integriert.

Dieses System, das es auch ermöglicht, bei einer Unterbrechung des Hauptnetzes die Fahrzeuge mithilfe des Hauptantriebs zurück in den Bahnhof zu bringen, ist in das Rettungskonzept integriert (elektrischer Notantrieb, Wegfall des Dieselmotors).

Für den Stromeinkauf wurde ein Vertrag geschlossen, der die Lieferung von zertifizierter Energie aus 100 % Wasserkraft sicherstellt. Auf diese Weise werden die 46 Fahrtenpaare der Standseilbahn mit null Kohlenstoffemissionen realisiert.

Executive Summary in Französisch

Le funiculaire Sierre-Montana-Crans relie Sierre à Crans-Montana en trafic régional. 46 paires de courses sur une amplitude horaire de 06h00 à 22h40 sont à disposition des voyageurs.

De par ses spécificités (longueur de 4'191 m, dénivelé de 927 m, capacité de 120 PAX, moteur de 1'000 kW) et ses contraintes d'exploitation (2 stations intermédiaires), l'installation présente des paramètres d'exploitation complexes.

Parallèlement à la reconstruction de l'installation en 2022 (ligne, gares, électromécanique, voiture), des réflexions ont été menées afin d'utiliser l'énergie produite au moment le plus favorable par une gestion automatique directe, permettant de diminuer la sollicitation du réseau.

L'énergie de freinage produite par l'installation était réinjectée dans le réseau du fournisseur sans gestion dynamique et sans plus-value. L'énergie produite n'était ainsi pas utilisée au moment le plus efficient selon les besoins de l'exploitation et ne permettait pas de diminuer les pointes de puissance ainsi que la consommation.

Le système innovant de stockage d'énergie « Energy Storage System For Ropeways » (ESFOR) qui optimise la consommation de l'énergie électrique a été intégré dans l'exploitation. Ce système d'accumulation d'énergie pour les installations à va-et-vient s'appuie sur un système très performant de batteries. Les coûts d'électricité sont ainsi réduits en utilisant l'énergie de freinage. L'accumulateur d'énergie agit alors comme un tampon directement dans l'entraînement de l'installation. Ainsi, lorsque celle-ci est freinée, l'énergie alimente l'accumulateur et est à nouveau disponible pour la prochaine accélération. L'installation photovoltaïque de 62 kWc sur le toit de la gare de Crans-Montana complète ce programme.

L'énergie solaire produite est stockée dans les mêmes batteries et est directement intégrée au système de gestion de l'énergie et à la commande du funiculaire.

Ce système, qui permet également de ramener les véhicules en gare avec l'entraînement principal en cas d'interruption du réseau principal, est intégré au concept de sauvetage (moteur de secours électrique, suppression du moteur diesel).

Pour ses achats d'électricité, un contrat assurant une livraison d'une énergie certifiée 100 % hydraulique a été conclu. Les 46 paires de course du funiculaire sont réalisées avec zéro émission carbone.

Executive Summary in English

The Sierre-Montana-Crans funicular is a regional route linking Sierre to Crans-Montana. A total of 46 simultaneous journeys are available to passengers between the hours of 06:00 and 22:40.

Due to its specific features (4,191m long, 927m difference in altitude, 120 PAX capacity, 1,000 kW motor) and operating constraints (2 intermediate stations), the installation has complex operating parameters.

As the system was being rebuilt in 2022 (the track, stations, electromechanical systems and carriages), ideas were explored to allow direct automatic management to use the energy produced at optimal times in order to reduce using the grid.

The braking energy produced by the system was being fed back to the grid network supplier without dynamic management or any gain. As a result, the energy produced was not being used when most required for operational needs, and it wasn't being used to reduce peak loads or energy consumption.

The innovative ESFOR (Energy Storage System For Ropeways) energy storage system, which improves electrical energy requirements, has been integrated into the operating system. This stop and go battery storage system relies on a very high-performance battery system. By using braking energy, electricity costs are reduced. The energy accumulator acts as a buffer directly in the system drive. When the brakes are applied, energy is fed into the accumulator and is available then for the next acceleration. The 62 kWp photovoltaic system on the roof of the Crans-Montana station completes the programme. The solar energy generated is stored in the same batteries, and is directly integrated into the funicular's energy management and control system.

This system, which also enables vehicles to be brought back to the station using the main drive in the event of a mains grid outage, is integrated in the rescue plan (electric emergency motor, elimination of the diesel engine).

As for purchasing electricity, the company has a contract which guarantees that the energy delivered is certified 100% hydraulic energy. The 46 simultaneous journeys on the funicular produce zero carbon emissions.

Zusammenfassung in Deutsch

Die Standseilbahn Sierre-Crans-Montana wird als öffentliches Verkehrsmittel im Regionalverkehr betrieben.

Die Standseilbahn wurde 1911 eröffnet. Im Zusammenhang mit ihrem Umbau und der Modernisierung der Streckeninfrastruktur im Jahr 1997 stellte sich die Frage nach der Energieeffizienz der neuen Anlage. Als Grundlage dafür wurden die folgenden Ziele ausgegeben:

- Energieeinsparung durch geringere Belastung des Netzes trotz einer Zunahme von 15 Fahrtenpaaren pro Tag (+48,4 %)
- Betrieb mit 100 % erneuerbarer Energie und null Kohlenstoffemissionen (durch den Einsatz von Eigenenergie und zertifizierter erneuerbarer Energie)
- Integration eines elektrischen Notantriebs (mit Batteriebetrieb) als Bestandteil des Rettungskonzepts (Wegfall des Dieselmotors)

Die Standseilbahn Biel-Magglingen ([Energiemanagement Bergbahnen mit Zwischenspeicher für PV und Rekuperation - Textes](#)) profitiert von einem System zur Rückgewinnung und Speicherung von Energie (ESöV2050 Projekt P-126). Aufgrund ihrer Größe und ihres Betriebs zeichnet sich die Standseilbahn Sierre-Crans-Montana durch komplexere Parameter aus als die Standseilbahn Biel-Magglingen.

Die Implementierung des ESFOR-Systems wurde vorgesehen und bei der Erneuerung in die Standseilbahn integriert. Die Anlage von 1997 wurde am 7. März 2022 außer Betrieb genommen. Die neue Anlage wurde den Fahrgästen am 11. Dezember 2022 zur Verfügung gestellt.

Ausgangslage

Austausch des Elektromotors von 1997

Ein Gleichstrom-Elektromotor mit Thyristorumrichter (920/1380 kW) wurde 1997 im Rahmen der Vereinigung der beiden historischen Sektionen und des Austauschs des elektromechanischen Teils der Anlage installiert.

Mit diesem Motor konnte die Bremsenergie in das Stromnetz des Anbieters eingespeist werden. Die Technologie funktionierte zwar hinsichtlich des Betriebsablaufs gut, war aber mit einem erheblichen Systemrisiko behaftet. Wenn die Anlage bei Gewitter (Blitz) im Generatorbetrieb lief, konnte diese Konstellation einen größeren Schaden am Motor verursachen (Überspannung, Überstrom) und zu einer längeren Betriebsunterbrechung führen. Dieses Phänomen trat zwischen 1997 und 2016 dreimal auf.

Um dieses Systemrisiko zu beseitigen, wurde 2016 beschlossen, den Gleichstrommotor mit Thyristorumrichter durch einen Asynchronmotor mit IGTB-Frequenzumrichter zu ersetzen. Der Austausch des Motors im Jahr 2016 sollte mit der vollständigen Renovierung der Standseilbahn vereinbar sein, die für den Zeitraum 2020-2022 geplant war. Bei dieser Gelegenheit wurden auch die Schaltschränke erneuert.

Sanierung der Standseilbahn 2022

Bei der Sanierung der Standseilbahn wurde die Schieneninfrastruktur von 1911 ausgewechselt, die Steuerung von 1997 sowie die Fahrzeuge von 1997, die elektromechanischen Komponenten von 1997 ausgetauscht und die Bahnhöfe umgestaltet. Von der Standseilbahn aus dem Jahr 1997 besteht somit noch der Motor von 2016 und der elektrische Teil von 2016. Der elektrische Teil aus dem Jahr 2016 profitierte von einer Nachrüstung im Jahr 2022. Der Motor von 2016 wurde in der Fabrik komplett überholt.

Die Erhöhung des Taktes von ursprünglich 30 auf 20 Minuten stand im Mittelpunkt der Betriebsziele. Somit erhöht sich die Anzahl der Fahrten von 30 auf 46 Paare pro Tag. Unter Berücksichtigung dieses Ziels und der geringen Auslastung der Umsteigestationen wurden 4 Haltestellen beseitigt.

Die Geschwindigkeit von 8,0 m/s und die Nutzlast pro Wagen (120 + 1 Person) stellten unveränderliche Parameter dar. Der Streckenverlauf wurde nicht verändert. Lediglich das Längsprofil wurde optimiert. Der talseitige Streckenabschnitt wird in gleicher Weise wie die alte Strecke mit einem Gleisbett betrieben. Auf dem bergseitigen Abschnitt wurde die Schiene auf zwei Längsschwellen aus Beton verlegt, wodurch unter den Laufrollen ein Hohlraum von etwa 70 Zentimetern entsteht (was sich bei Schneefall günstig auswirkt).

Energieeffizienz

Parallel zur Sanierung der Anlage wurden Überlegungen angestellt, wie die erzeugte Energie zum günstigsten Zeitpunkt durch eine direkte automatische Steuerung genutzt werden kann, um die Belastung des öffentlichen Netzes zu verringern.

Zuvor wurde die von der Anlage erzeugte Bremsenergie ohne dynamische Steuerung und ohne Mehrwert in das Netz des Anbieters zurückgespeist. Somit wurde die erzeugte Energie nicht zum effizientesten Zeitpunkt bedarfsorientiert genutzt und ermöglichte es nicht, die Leistungsspitzen und den Verbrauch zu senken.

Dieses System, das es auch ermöglicht, bei einer Unterbrechung des Hauptnetzes die Fahrzeuge mithilfe des Hauptantriebs zurück zur nächsten Station zu bringen, ist in die Notantriebsfunktionalität integriert (elektrischer Notantrieb, Wegfall des Dieselmotors).

Das System wird durch eine Photovoltaikanlage mit 62 kWp auf dem Dach des Bahnhofs Crans-Montana ergänzt.

Bei dem Projekt zur Rückgewinnung und Speicherung der erzeugten Energie handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Projekts 126 der Standseilbahn Biel-Maggingen.

Die Standseilbahn Sierre-Crans-Montana weist aufgrund ihrer Besonderheiten (Länge 4'191 m, Höhenunterschied 927 m) und ihrer betrieblichen Einschränkungen mit zwei nicht synchronisierbaren Umsteigestationen extreme Parameter auf, d. h. sie verfügt auch weiterhin über ein interessantes Entwicklungspotenzial.

Das ESFOR-System wurde parallel zur Erneuerung der Anlage implementiert.

Technische Ziele

- Seilbahnantrieb Crans-Montana: Ausbau der Räumlichkeiten und der Nutzfläche für die Implementierung des Systems zur Energierückgewinnung und Speicherung. Der Personalraum neben dem Maschinenraum wurde für die Unterbringung der Speicher- und Managementsysteme umfunktioniert.
- Integration des Speichersystems in den Hauptantrieb, anstatt Anschluss an das Hauptnetz. Dies bringt eine höhere Energieeffizienz mit sich.
- Verringerung unterschiedlicher Konverter. Dies reduziert sowohl die Systemkomplexität als auch die Produktions- und Wartungskosten.
- Einsatz leistungsfähigerer Batterien vom Typ LTO (C-Rate 4-8) anstelle von Batterien vom Typ NMC (C-Rate 1). Dadurch lässt sich die Größe der Batterien optimieren, sodass Leistungsspitzen reduziert werden können. Es handelt sich um ein besonders robustes System, das für den Einsatz in Bahnapplikationen entwickelt wurde.
- Wasserkühlsystem für Batterien, das die Lebensdauer der Batterien verlängert und die Installation von Batterien unter nicht idealen klimatischen Bedingungen ermöglicht.
- Modulares Energiespeichersystem, das an den Bedarf zukünftiger Anlagen angepasst werden kann.
- Installation einer Photovoltaikanlage mit 62 kWp auf dem Dach des Bahnhofs Crans-Montana.

Betriebliche Ziele

- Speicherung der Bremsenergie der Anlage, anstatt sie in das Netz des Stromversorgers rückzuspeisen.
- Speicherung der Stromproduktion der Photovoltaikanlage. Keine Einspeisung in das Netz des Anbieters.
- Minimierung von Leistungsspitzen.
- Reduzierung der Belastung des Stromnetzes.
- Verbesserte Verfügbarkeit der Infrastruktur für das Rettungskonzept. Austausch des Diesel-Notantriebs durch einen Elektromotor an der Antriebsscheibe.
- Betrieb der Standseilbahn mit 100 % erneuerbarer Energie und null Kohlenstoffemissionen (durch den Einsatz von Eigenenergie und zertifizierter Wasserkraft).

Herausforderungen

- Längste Standseilbahn der Schweiz (4'191 m).
- Entwicklung der neuen Speicherlösung für Sierre-Crans-Montana.
- Enger Zeitplan (279 Tage zwischen der Abschaltung der alten Anlage und der Wiederaufnahme des kommerziellen Betriebs der neuen Anlage).
- Verzögerungen beim Bau (Zeitverzögerung bei der Bereitstellung der Strecke für Tests).
- Lieferengpässe (angespannte Versorgungslage im Zusammenhang mit der globalen geopolitischen Situation).
- Schnittstelle zwischen den einzelnen Akteuren, d. h. den Anbietern des ESFOR-Systems, der Photovoltaikanlage, der Elektrik und der elektromechanischen Komponenten.

Ausführung

Batterien

48 Batterien vom Typ LTO (Lithium-Titanat-Oxid) wurden in 4 Schaltschränken in der Bergstation Crans-Montana installiert. Die Kapazität beträgt 30 kWh pro Schrank, dies ergibt eine Gesamtkapazität von 120 kWh.

Kühlsystem

In Anbetracht der Wärmeabgabe der Batterien ist ein Kühlsystem erforderlich, das die Überhitzung des Systems verhindert. Im Bahnhof Crans-Montana wird im Winter die freigesetzte Warmluft genutzt, um

die Fahrgastbereiche zu temperieren. Im Sommer wird das System umgekehrt und die Warmluft aus dem Gebäude hinausgeleitet. Alle elektrischen Heizkörper in den Fahrgastbereichen wurden entfernt.

In diesem Raum befindet sich auch der Wechselrichter der Photovoltaikanlage.



Abbildung : Kühlsystem im Vordergrund, Batterieschränke im Hintergrund

Photovoltaikanlage

Der Bahnhof von Crans-Montana liegt auf einer Höhe von 1'412 m verzeichnet etwa 2'000 Sonnenstunden pro Jahr. Die Photovoltaikanlage erbringt eine Leistung von 62 kWp. Die erzeugte Energie wird direkt in den Batterien gespeichert und der Anlage zugeführt. Die Solarenergie wird zu 99,99 % selbst verbraucht.



Abbildung : Photovoltaikanlage, Bahnhof Crans-Montana

Funktionsweise

Das Energiespeichersystem optimiert den Energieverbrauch. Der Energiespeicher fungiert direkt im Betrieb als Reserve: Die Energie wird beim Bremsvorgang gespeichert und kann bei der nächsten Beschleunigung eingesetzt werden.

Die Energie, die von der Photovoltaikanlage auf dem Dach des Bahnhofs Crans-Montana erzeugt wird, wird gespeichert und in das System eingespeist. Durch diese Konfiguration werden Lastspitzen geglättet und das Stromnetz wird weniger belastet.

Ein weiterer Vorteil des Systems besteht darin, dass es als Notantrieb verwendet werden kann, z. B. bei einem Stromausfall oder einem Ausfall des Hauptmotors. Mit dem elektrischen Notantrieb wurde der Notantrieb ersetzt, der mit Diesel betrieben wurde.

Zuverlässigkeit

99,07 % der für 2023 geplanten Fahrten und 99,66 % der am 30.09.2024 geplanten Fahrten wurden durchgeführt. Das Gesamtsystem weist eine sehr hohe Zuverlässigkeit auf. Das ESFOR-System hat keine Betriebsunterbrechungen verursacht.

Schlussfolgerungen

Bei der Standseilbahn Sierre – Montana wurde zum ersten Mal das Energiespeichersystem ESFOR eingesetzt. Das Energiespeichersystem ESFOR wurde von Frey Stans entwickelt für den Einsatz bei Seilbahnen mit Pendelbetrieb. ESFOR ist bei der Standseilbahn Sierre – Montana seit Ende 2022 erfolgreich in Betrieb. Später wurde noch eine PV-Anlage (Photovoltaikanlage) mit einer Leistung von 62 kWp in Betrieb genommen, welche auf dem Dach der Bergstation installiert ist. Der Seilbahnbetreiber ist Mittelspannungsbezüger und ab der gleichen Mittelspannungseinspeisung ist neben der Seilbahn noch das Stationsgebäude gespeist. Das Energiespeichersystem dient zum Zwischenspeichern von Energie und zur Sicherstellung der Räumung bei Ausfall der Hauptenergieversorgung.

Die Auswertungen zeigen, dass an einem Tag mit guter Witterung im Sommer, unter der Annahme von einem bestimmten zur Seilbahn zusätzlichen Verbrauch, bis 25.5 % des gesamten Energiebedarfs (Seilbahn/Station) lokal durch die PV-Anlage und die Seilbahn (Bremsen) produziert wird und dank dem Energiespeichersystem auch lokal wiederverwendet werden kann. Die Eigenverbrauchsrate liegt, dank dem Energiespeichersystem, bei 100 %. Bezogen nur auf den Seilbahnmotor wird an einem solchen Tag rund 41 % der für das Fortbewegen der Seilbahn benötigten Energie direkt vor Ort produziert und verbraucht.

Die Seilbahn Sierre – Montana besitzt keinen klassischen Notantrieb mehr. Die Funktionalität des Notantriebs ist aufgeteilt auf den Hauptantrieb mit Energiespeichersystem und auf den sogenannten Ersatzräumungsantrieb. Bei Ausfall der Hauptenergieversorgung wird die Räumung mit dem Hauptantrieb, gespeist ab dem Energiespeichersystem ESFOR, sichergestellt. Bei Ausfall einer Komponente im Hauptantriebsstrang wird die Räumung mit dem Ersatzräumungsantrieb, gespeist direkt ab dem Stromnetz, sichergestellt. Der Dieselmotor des klassischen Notantriebs entfällt. Damit entfallen auch die Kosten für die Beschaffung des Dieselmotors, der Platzbedarf, die Aufwände für die Lüftung des Aufstellungsortes und der Wartungsaufwand.

Zusammenfassung in Französisch

Objectifs stratégiques

Le funiculaire Sierre-Crans-Montana est un transport public dont la ligne est exploitée en trafic régional. Dans le cadre du remplacement de l'installation de 1997 et des infrastructures de ligne de 1911/1997, la question relative à l'efficacité énergétique de la nouvelle installation s'est posée. Les objectifs suivants ont été retenus comme base de travail :

- Une économie d'énergie par une diminution de la sollicitation du réseau malgré une augmentation de 15 paires de courses par jour (+48.4 %).
- Une exploitation à 100 % renouvelable et zéro émission carbone (énergie propre et achat d'une énergie renouvelable certifiée).
- Intégration d'un moteur de secours électrique (alimentation par batteries) dans le cadre du plan de sauvetage (suppression du moteur diesel).

Le funiculaire Bienne-Macolin bénéficie d'un système de récupération et de stockage de l'énergie (P-126). De par sa dimension et son exploitation, le funiculaire Sierre-Crans-Montana se caractérise par des paramètres plus complexes que ceux du funiculaire Bienne-Macolin.

L'implantation du système ESFOR a été retenu et intégré à la reconstruction du funiculaire. L'installation 1997 a été mise hors service le 7 mars 2022. La nouvelle installation a été mise à disposition des voyageurs le 11 décembre 2022.

Contexte de départ

Remplacement du moteur électrique 1997

Un moteur électrique à courant continu avec convertisseur à thyristors (920/1380 kW) a été installé en 1997 dans le cadre de la fusion des 2 sections historiques et du remplacement de la partie électromécanique.

Ce moteur permettait de réinjecter l'énergie de freinage sur le réseau électrique du distributeur. Si cette technologie fonctionnait bien en terme d'exploitation, elle présentait un risque systémique important. Lorsque l'installation fonctionnait en mode générateur et par temps d'orage (foudre), cette constellation pouvait provoquer un dégât majeur sur le moteur (surtension, surintensité), engendrant un arrêt d'exploitation de longue durée. Ce phénomène s'est produit à 3 reprises entre 1997 et 2016.

Afin d'éliminer ce risque systémique, la décision fut prise en 2016 de remplacer le moteur à courant continu avec convertisseur à thyristors par un moteur asynchrone et variateurs de fréquences IGBT. Le remplacement du moteur en 2016 devait être compatible avec la rénovation totale du funiculaire qui était escomptée à l'horizon 2020-2022. Les armoires électriques ont été remises à neuf à cette occasion.

Reconstruction du funiculaire 2022

Le projet de la reconstruction du funiculaire consistait au remplacement des infrastructures de rail de 1911, le remplacement de la commande 1997, le remplacement des voitures 1997, le remplacement des éléments électromécaniques 1997 et le réaménagement des gares. Subsiste du funiculaire 1997, le moteur 2016 et la partie électrique 2016. La partie électrique 2016 a bénéficié d'un retrofit en 2022. Le moteur 2016 a fait l'objet d'une révision complète en usine.

L'augmentation de la cadence à 20 minutes, contre 30 initialement, figurait au cœur des objectifs d'exploitation. Le nombre de courses passe ainsi de 30 à 46 paires par jour. Compte tenu de cet objectif et de la faible fréquentation des stations intermédiaires, 4 arrêts ont été supprimés.

La vitesse de 8.0 m/s ainsi que la charge utile par voiture (120 + 1 pers.) étaient des paramètres intangibles. Le parcours n'a pas été modifié. Seul le profil en long a été optimisé. La partie aval est exploitée sur ballast de manière identique à l'ancienne ligne. Sur la partie amont, le rail est posé sur 2 longrines en béton, permettant ainsi d'obtenir un vide d'environ 70 centimètres sous les poulies (favorable lors de chute de neige).

Efficiences énergétique

Parallèlement à la reconstruction de l'installation, des réflexions ont été menées afin d'utiliser l'énergie produite au moment le plus favorable par une gestion automatique directe, permettant de diminuer la sollicitation du réseau.

L'énergie de freinage produite par l'installation était réinjectée dans le réseau du fournisseur sans gestion dynamique et sans plus-value. L'énergie produite n'était ainsi pas utilisée au moment le plus efficace selon les besoins de l'exploitation et ne permettait pas de diminuer les pointes de puissance ainsi que la consommation.

Ce système, qui permet également de ramener les véhicules en gare avec l'entraînement principal en cas d'interruption du réseau principal, est intégré au concept de sauvetage (secours électrique, suppression du moteur diesel).

Le système est complété par une installation photovoltaïque de 62 kWc installée sur le toit de la gare de Crans-Montana.

Le projet de récupération et le stockage de l'énergie produite est une évolution du projet 126 (ESöV2050 Projekt P-126) du funiculaire Bienne-Macolin ([Energiemanagement Bergbahnen mit Zwischenspeicher für PV und Rekuperation - Textes](#)).

Le funiculaire Sierre-Crans-Montana, par ses spécificités (longueur de 4'191 m, dénivelé de 927 m) et ses contraintes d'exploitation avec 2 stations intermédiaires non synchronisables présente des paramètres extrêmes, soit un potentiel de développement intéressant.

Le système ESFOR a été implanté en parallèle à la reconstruction de l'installation.

Objectifs Techniques

- Station motrice de Crans-Montana : aménagement des locaux et de la place utile pour l'implantation du système de stockage et de récupération de l'énergie. Le local du personnel, qui se situe en parallèle à la salle des machines, a été réaffecté pour accueillir les installations de stockage et de gestion.
- Intégration du système de stockage dans l'entraînement principal au lieu d'être connecté sur le côté du réseau principal. Cela comporte une efficacité énergétique supérieure.
- Diminution de la diversité des convertisseurs. Par conséquent réduction de la complexité du système et des coûts de production et de maintenance.
- Batteries plus performantes du type LTO (C-Rate 4-8) au lieu des batteries du type NMC (C-Rate 1). Cela permet d'optimiser la dimension des batteries nécessaire pour réduire les pics de puissance. Il s'agit d'un système particulièrement robuste développé pour des applications de traction.
- Système de refroidissement des batteries à eau qui permet d'augmenter la durée de vie des batteries et d'installer les batteries dans des conditions climatiques non idéales.
- Système de stockage d'énergie modulaire qui peut être adapté aux besoins des futures installations.
- Implantation d'une installation photovoltaïque de 62 kWc sur le toit de la gare de Crans-Montana.

Objectifs d'exploitation

- Stockage de l'énergie de freinage de l'installation au lieu de la réinjecter dans le réseau du distributeur.
- Stockage de la production de l'installation photovoltaïque. Pas d'injection dans le réseau du distributeur.
- Minimisation des pointes de puissance.
- Réduction de la sollicitation du réseau.
- Amélioration de la disponibilité de l'infrastructure de sauvetage. Remplacement du moteur de secours diesel par un moteur électrique sur la poulie motrice.
- Exploitation du funiculaire avec une énergie à 100 % renouvelable et zéro émission carbone (énergie produite et achat d'une énergie hydraulique certifiée).

Défis

- Längste Standseilbahn der Schweiz (4'191 M.).
- Entwicklung der neuen Speicherlösung für Sierre-Crans-Montana.
- Enger Zeitplan (279 jours entre l'arrêt de l'ancienne installation et la reprise de l'exploitation commerciale de la nouvelle installation).
- Verzögerungen beim Bau (retard dans la mise à disposition de la ligne pour les essais).
- Lieferengpässe (approvisionnement tendu en lien avec la géopolitique mondiale).
- Interface entre les acteurs (fournisseur ESFOR, fournisseur installation photovoltaïque, électricien, fournisseur électromécanique).

Réalisation

Batteries

48 batteries de type LTO (lithium Titanate Oxide) ont été installées dans 4 armoires à la station amont de Crans-Montana. La capacité est de 30 kWh par armoire, soit une capacité totale de 120 kWh.

Système de refroidissement

Compte tenu de l'émission de chaleur par les batteries, un système de refroidissement est nécessaire afin d'éviter une surchauffe du système. L'air chaud est dégagé et pulsé dans la gare de Crans-Montana en hiver, permettant ainsi de tempérer les espaces voyageurs. En été, le système est inversé et l'air chaud expulsé à l'extérieur du bâtiment. L'ensemble des radiateurs électriques de l'espace voyageurs a été supprimé.

Dans la même salle, on retrouve l'onduleur de l'installation photovoltaïque.



Figure : Système de refroidissement au 1er plan, armoires à batteries au 2^{ème} plan

Installation photovoltaïque

La gare de Crans-Montana est située à une altitude de 1'412 m. Environ 2'000 heures d'ensoleillement par année sont enregistrées. L'installation photovoltaïque a une puissance de 62 kWc. L'énergie produite est directement stockée dans les batteries et dédiée à l'installation. L'énergie solaire est autoconsommée à 99.99 %.



Figure : Installation photovoltaïque, gare de Crans-Montana

Fonctionnement

Le système de stockage d'énergie optimise la consommation d'énergie. Le stockage d'énergie fait office de réserve directement dans l'exploitation : l'énergie est accumulée lors du freinage et peut être employée à la prochaine accélération.

L'énergie produite par l'installation photovoltaïque installée sur le toit de la gare de Crans-Montana est stockée et reliée au système. Cette configuration permet de lisser l'énergie de pointe et de moins solliciter le réseau.

Un autre avantage du système est la possibilité de l'utiliser comme un entraînement de secours, par exemple en cas de coupure d'électricité ou de panne du moteur principal. Le moteur de secours électrique a remplacé l'entraînement d'urgence qui fonctionnait au diesel.

Fiabilité

99.07 % des courses planifiées en 2023 et 99.66 % au 30.09.2024 ont été réalisées. Le système global présente un très haut taux de fiabilité. Le système ESFOR n'a engendré aucun arrêt d'exploitation.

Résultats

Les conditions cadres qui prévalaient à l'origine du projet sont caduques. Si le prix d'achat du kWh était de 6.16 ct (contrat 2021-2023) au lancement du projet, celui-ci est actuellement de 15.64 ct au 01.01.2024 (contrat 2024-2026).

Avec une diminution moyenne de 25.3 % de l'énergie achetée par course, on peut sans autre affirmer que de ce projet découle une économie marquée des coûts d'achat de l'électricité.

Conclusions

Le système d'accumulation d'énergie ESFOR a été utilisé pour la première fois dans le funiculaire Sierre - Montana. Celui-ci a été développé par Frey Stans pour l'utilisation dans des installations de type à va-et-vient. ESFOR est en service avec succès sur le funiculaire Sierre - Montana depuis fin 2022. Parallèlement, une installation photovoltaïque d'une puissance de 62 kWc a été mise en service peu après sur le toit de la station amont. L'exploitant du funiculaire est un consommateur de moyenne tension. Le bâtiment de la station est également alimenté en plus du funiculaire à partir de la même alimentation en moyenne tension. Le système de stockage est utilisé pour stocker temporairement l'énergie. Il sert également à assurer l'évacuation de secours de l'installation en cas de défaillance de l'alimentation électrique principale.

Les évaluations montrent que lors d'une journée de beau temps en été, en supposant une certaine consommation supplémentaire en plus du funiculaire, jusqu'à 25,5 % de la demande totale d'énergie (funiculaire/station) est produite localement par le système photovoltaïque et le funiculaire (énergie de freinage). Cette production est réutilisée localement par l'intermédiaire du système de stockage d'énergie. Le taux d'autoconsommation est de 100% grâce au système de stockage d'énergie. Si l'on se réfère uniquement au moteur du funiculaire, environ 41 % de l'énergie nécessaire pour faire avancer l'installation est produite et consommée directement sur place un tel jour.

Le funiculaire Sierre – Montana ne dispose plus d'un entraînement d'urgence classique. La fonctionnalité de l'entraînement de secours est répartie entre l'entraînement principal avec système d'accumulation d'énergie et un entraînement de dégagement dit de secours.

En cas de panne de l'alimentation principale, l'évacuation est assurée par l'entraînement principal qui est alimenté par le système de stockage d'énergie ESFOR. En cas de défaillance d'un composant de la chaîne cinématique principale, l'évacuation est assurée par le moteur de secours électrique, alimenté directement par le réseau électrique ou le système de stockage d'énergie. Le moteur diesel de l'entraînement d'urgence classique est supprimé. Cela élimine également les coûts d'investissement initiaux du moteur diesel, l'espace requis, la ventilation du site d'installation et la maintenance.

1. Ausgangslage

Die Standseilbahn Sierre – Montana wurde im Jahre 2022 totalsaniert. Im Rahmen von dieser Sanierung hat Frey Stans auch der grösste Teil der Elektrotechnik der Seilbahn ersetzt. Die Firma Frey Stans gehört zum Doppelmayr-Garaventa-Konzern und hat im Rahmen von dieser Sanierung das Antriebssystem der Bahn mit einem elektrischen Energiespeicher erweitert.

Frey Stans hat im Jahre 2019 bereit die Standseilbahn Biel – Magglingen mit einem elektrischen Energiespeichersystem ausgerüstet. Beim Projekt Biel – Magglingen wurde ein handelsüblicher Industrie-Energiespeicher basierend auf Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Batterien (NMC) eingesetzt und die Umsetzung erfolgte in Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern (HSLU) und dem Industriepartner ABB.

Seit Ende 2019 produziert ABB in Baden in der Schweiz sehr leistungsfähige Lithium-Titanate-Oxid-Batteriemodule (LTO) für Traktionsanwendungen. Batterien welche auf LTO-Technologie basieren, sind gegenüber NMC Batterien im Verhältnis zu ihrer Kapazität bedeutend leistungsfähiger. Dies kann bei der Anwendung bei Seilbahnen mit Pendelbetrieb ein grosser Vorteil sein. Aus diesem Grund entwickelte Frey Stans in enger Absprache mit ABB und unter Mithilfe der Hochschule Luzern ein Energiespeichersystem für Seilbahnen im Pendelbetrieb mit dem Produktnamen ESFOR (Energy Storage System For Ropeways) basierend auf diesen LTO-Batteriemodulen.

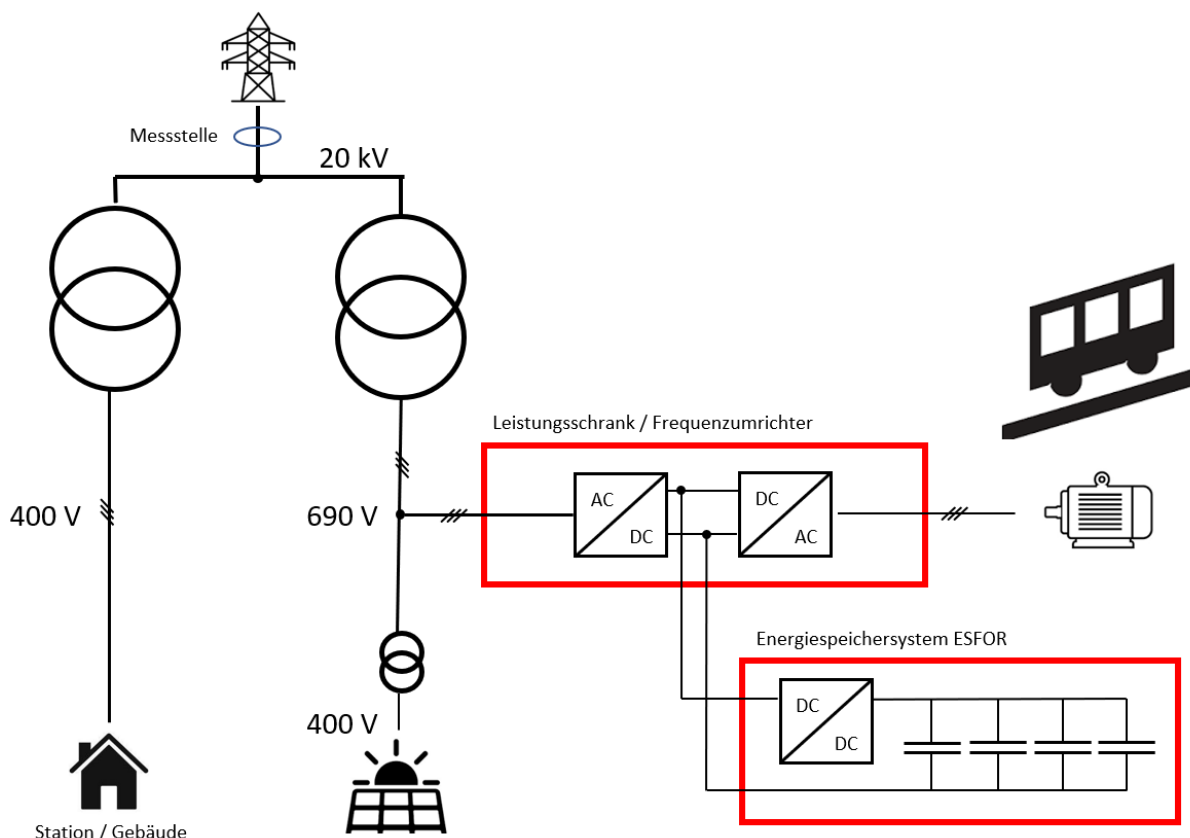
Bei der Standseilbahn Sierre – Montana wurde ESFOR zum ersten Mal eingesetzt. Der vorliegende Bericht ist eine Auswertung des Herstellers Frey Stans zur ersten Umsetzung und zum erstmaligen Einsatz von ESFOR.

2. Ziel der Arbeit

Das Energiespeichersystem ESFOR kann für verschiedene Anwendungsziele eingesetzt werden, um den Leistungs- und Energiebedarf eines Energiesystems (Seilbahn, lokale Energieerzeugungsanlage, zusätzliche Verbraucher, etc.) zu optimieren. Beim Projekt Standseilbahn Sierre – Montana standen die nachfolgend in diesem Kapitel beschriebenen Anwendungsziele im Vordergrund. Zuerst wird aber anhand von einer Prinzipdarstellung die im Jahr 2022 geplante Ausgangslage beschrieben.

2.1 PRINZIPDARSTELLUNG

Die nachfolgende *Darstellung 2-1* zeigt eine Prinzipdarstellung von Einspeisung, Leistungssteller Hauptantrieb (Frequenzumrichter) und des Energiespeichersystems der Standseilbahn Sierre – Montana, wie es im Jahr 2022 geplant wurde.



Darstellung 2-1: Prinzipdarstellung Stand 2022

Zu beachten ist, dass der Hauptantrieb der Seilbahn mit 690 V Nennspannung gespeist ist. Der Transformator des Hauptantriebs wurde aber im Rahmen der im Jahre 2022 durchgeführten Erneuerungen nicht ersetzt und entsprechend übernommen. Der Seilbahnbetreiber SMC (Compagnie de chemin de fer et d'autobus Sierre – Montana – Crans SA) ist Mittelspannungsbezüger, weshalb der Zähler für die

Verrechnung (Messstelle) auf der Mittelspannungsseite angeordnet ist. Der Leistungssteller des Seilbahnantriebs besteht aus einem Frequenzumrichter. Das Energiespeichersystem ESFOR ist an diesem Frequenzumrichter angeschlossen. Das Energiespeichersystem ESFOR besteht im Wesentlichen aus den LTO-Hochleistungsbatterien von ABB und einem DC/DC-Wandler, welcher die Batterie mit dem Gleichstromzwischenkreis des Frequenzumrichters verbindet.

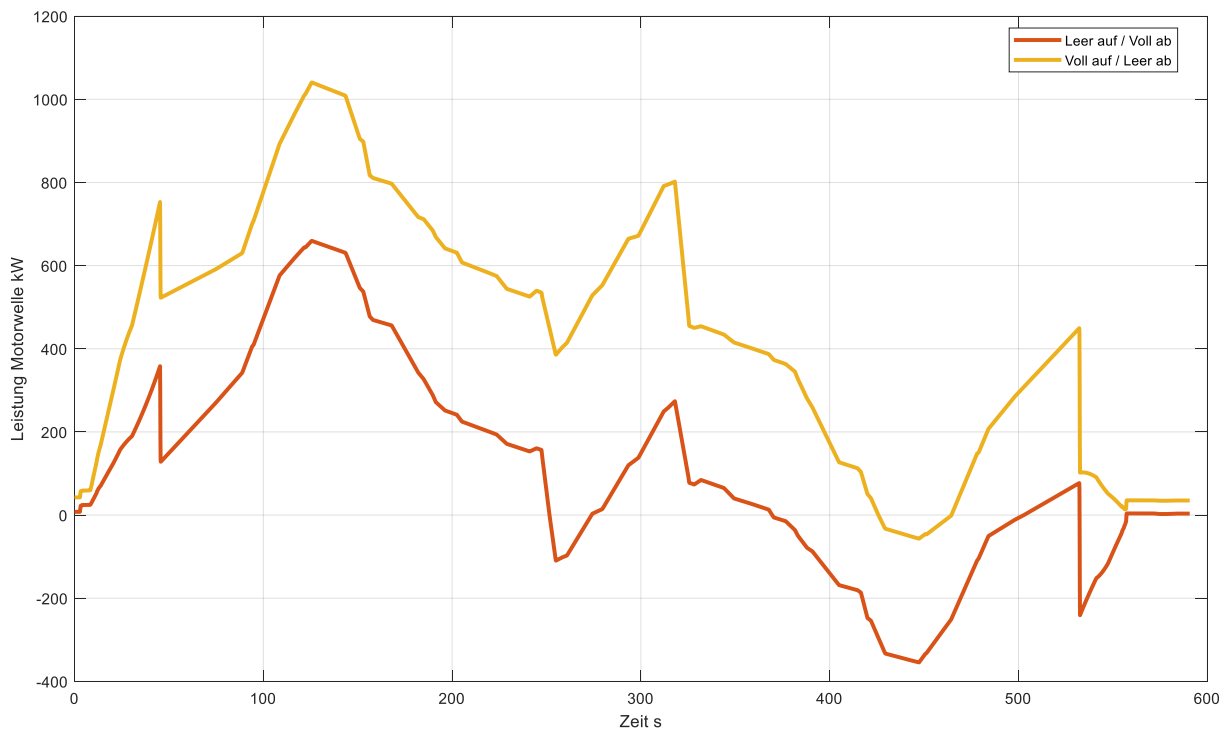
2.2 ZWISCHENSPEICHERUNG VON ENERGIE

Das Gebäude der Bergstation wurde im Rahmen der Totalsanierung der Bahn mit einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) ausgerüstet. Die von dieser PV-Anlage produzierte Energie soll möglichst komplett zum Antreiben der Bahn verwendet werden.



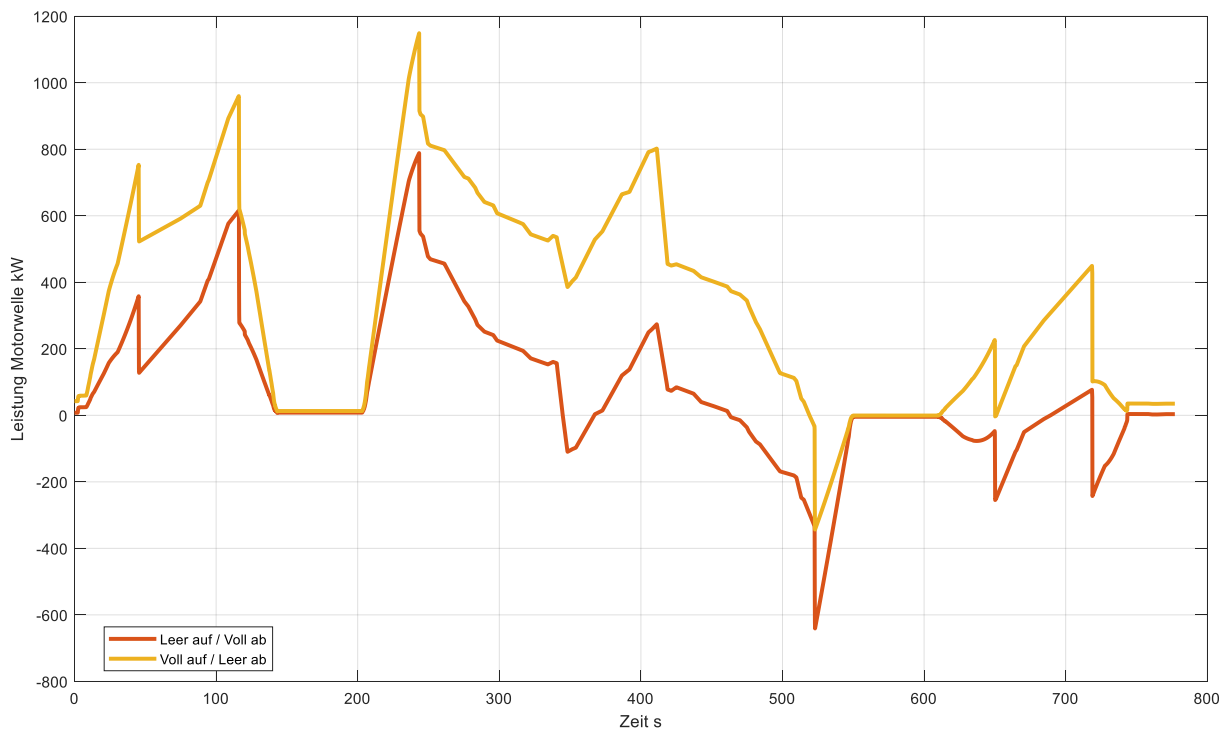
Darstellung 2-2: Photovoltaikanlage Gebäude Bergstation Standseilbahn Sierre-Montana

Seilbahnen mit Pendelbetrieb haben aber im Allgemeinen über einen ganzen Fahrtzyklus (komplette Fahrt inklusive Stillstandzeiten bis zur nächsten Fahrt) einen sehr variablen Leistungsaufnahmeverlauf, woraus ein sehr unregelmäßiger Energiebedarf resultiert. Die nachfolgende Darstellung 2-3 zeigt beispielhaft den Leistungsbedarf des Antriebsmotors der Seilbahn Sierre - Montana während einer Fahrt ohne Halt an den Zwischenstationen bei zwei unterschiedlichen Lastsituationen.



Darstellung 2-3: Berechneter Leistungsbedarf Motorwelle während einer Fahrt ohne Zwischenhalt

Die nachfolgende *Darstellung 2-4* zeigt beispielhaft den Leistungsbedarf des Antriebsmotors der Seilbahn Sierre - Montana während einer Fahrt mit Halt an der Zwischenstation Bluche bei zwei unterschiedlichen Lastsituationen.



Darstellung 2-4: Berechneter Leistungsbedarf Motorwelle während einer Fahrt mit Zwischenhalt bei der Station Bluche

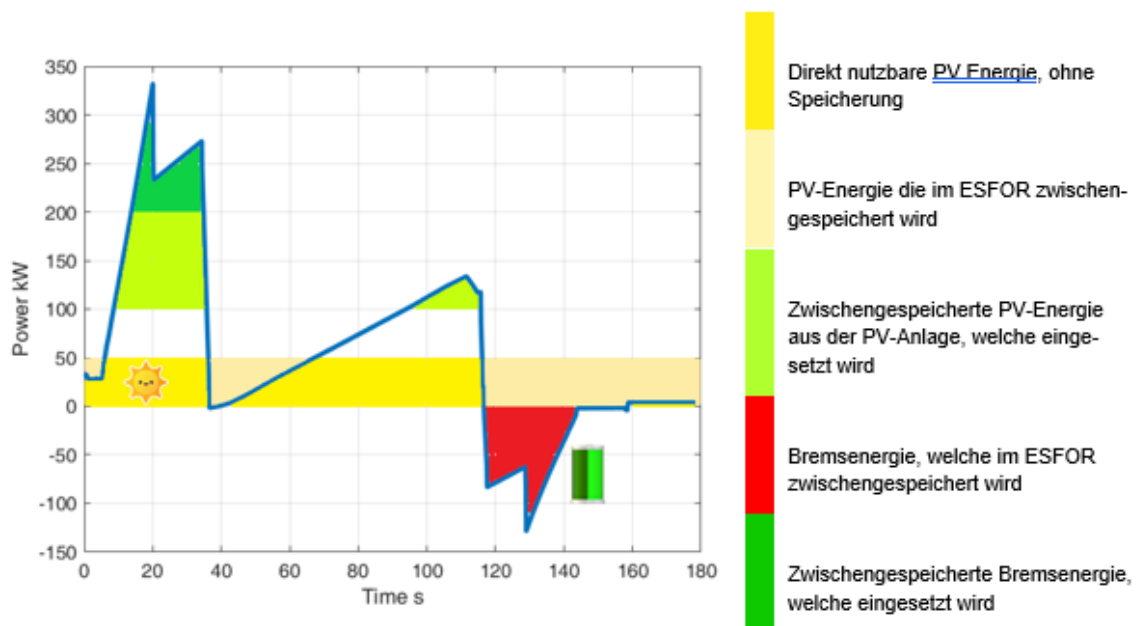
Grundlage für die vorangehenden Darstellungen ist die theoretische Seilberechnung des Seilbahnbauers Garaventa. Der Leistungsbedarf variiert in Abhängigkeit der physikalischen Gegebenheiten der Bahn. Im Gegensatz zum Verbrauch des Seilbahnmotors ist die Produktion einer lokalen PV-Anlage bedeutend konstanter. Die Produktion variiert in Abhängigkeit von Wetter, Jahres- und Tageszeit, ver-

ändert sich im Allgemeinen aber nur langsam. Mit dem Energiespeichersystem ESFOR soll der Energieverbrauch und die Energieproduktion besser aufeinander abgestimmt werden. Ist der aktuelle Energieverbrauch der Seilbahn tiefer als die Energieproduktion der PV-Anlage, wird die überschüssige Energie im Energiespeichersystem gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt, wenn der Energieverbrauch höher als die Produktion ist, wiederverwendet, was dazu führt, dass die Eigenverbrauchsrate der PV-Anlage erhöht werden kann und der Energiebezug ab dem speisenden Stromnetz abnimmt.

Bei einer Seilbahn mit Pendelbetrieb können in Abhängigkeit der Fahrzeugbeladung und der Fahrzeugposition grosse Bremsleistungen anfallen. In der Schweiz wird im Allgemeinen die daraus resultierende Energie in das speisende Stromnetz zurückgespeist (Rekuperation). Häufig wird diese von der Seilbahn erzeugte Energie aber nicht oder nur sehr schlecht entschädigt. Je nach Situation gibt es im näheren Umfeld der Seilbahn keine Verbraucher, welche die entsprechenden Leistungsspitzen aufnehmen können, was dazu führt, dass in solchen Situationen diese Bremsenergie im speisenden Stromnetz ziemlich weit zurückfliesst, bis Verbraucher da sind, welche diese Energie aufnehmen können, was eine zusätzliche Belastung des Stromnetzes darstellt und bei den involvierten Komponenten wie Transformatoren und Kabeln zu zusätzlichen Verlusten führt.

Das Energiespeichersystem ESFOR soll die anfallende Bremsenergie so weit wie möglich aufnehmen und zwischenspeichern, damit sie zu einem späteren Zeitpunkt, wenn der Seilbahnmotor die Seilbahn wieder antreiben muss, direkt im Seilbahnantrieb wiederverwendet werden kann. Diese Zwischenspeicherung führt dazu, dass der Energiebezug aus dem speisenden Stromnetz abnimmt.

Die nachfolgende Darstellung 2.5 zeigt grafisch das Prinzip der Zwischenspeicherung von lokal produzierter PV-Energie und von Bremsenergie und deren späteren Wiederverwendung bei einer Seilbahn mit Pendelbetrieb mit leistungsfähigem Energiespeichersystem. Hinweis: Der dargestellte Leistungsverlauf entspricht nicht dem Leistungsverlauf bei der Standseilbahn Sierre – Montana, sondern ist eine generische Darstellung, um das Prinzip der Zwischenspeicherung möglichst anschaulich zu erläutern.



Darstellung 2-5: Zwischenspeichern und wiederverwenden von Energie

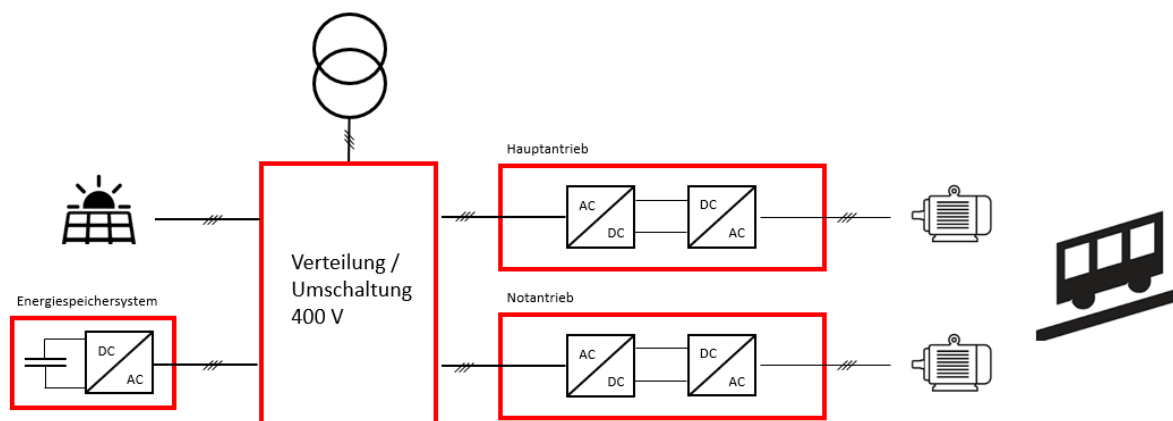
Die PV-Anlage leistet in diesem Beispiel konstant 50 kW Leistung. Die dunkelgelb markierte Fläche kann direkt und ohne Energiespeichersystem genutzt werden. Die hellgelbe Fläche wird kurzzeitig gespeichert und während der nächsten Fahrt wieder genutzt (hellgrüne Fläche). Die rot markierte negative Energie (Bremsenergie/Rekuperation) wird ebenfalls zwischengespeichert und bei der nächsten Fahrt genutzt (dunkelgrüne Fläche). Dadurch wird ein relevanter Teil der benötigten Energie lokal produziert und verwendet und der Energiebezug ab dem speisenden Stromnetz sinkt. Ohne Energiespeichersystem kann nur die dunkelgelbe Fläche für die Fahrt verwendet werden. Die restliche Energie (hellgelb und rot) wird zurückgespeist ins Stromnetz und muss bei der nächsten Fahrt wiederbeschafft werden.

2.3 REDUKTION SPITZENLEISTUNG

Mit einem Energiespeichersystem kann die Spitzenleistung bei der Netzeinspeisung reduziert werden. Beim Begriff Spitzenleistung ist aber zu differenzieren zwischen der absoluten Leistungsspitze, dem höchsten Leistungswert welcher innerhalb einer betrachteten Zeitperiode am Einspeisepunkt auftritt, und dem 15-Minuten-Leistungsspitzenwert. Die absolute Leistungsspitze ist massgebend für die Auslegung der Energieversorgung der Seilbahn bezogen auf die Spannungshaltung. Die Energieversorgung muss so realisiert werden, dass beim Auftreten der absoluten Leistungsspitze die Spannung am Einspeisepunkt nicht zu stark absinkt. Der 15-Minuten-Leistungsspitzenwert entspricht dem über eine Zeitperiode von 15-Minuten gemittelten Bezugs-Leistungswert am Einspeisepunkt und ist massgebend für die thermische Belastung des speisenden Stromnetzes und in der Schweiz häufig relevant für die Verrechnung der leistungsbezogenen Netznutzungskosten von Grossverbrauchern. Wird die Energieversorgung von einer Seilbahn komplett neu gebaut, ist es wirtschaftlich interessant, die absolute Spitzenleistung zu reduzieren, um die Kosten für die Erstellung der Stromversorgung zu verringern (kleinere Kabelquerschnitte, kleinerer Transformator, etc.). Später im Betrieb, ist es häufig nur noch interessant, den 15-Minuten-Leistungsspitzenwert möglichst tief zu halten. Da beim Projekt Standseilbahn Sierre – Montana bei der Sanierung im Jahre 2022 die Komponenten der Energieversorgung nicht ersetzt wurden, lag somit die Reduktion des absoluten Leistungsspitzenwerts nicht im Fokus. Klar als Ziel definiert wurde, mit dem Energiespeichersystem den 15-Minuten-Leistungsspitzenwert zu reduzieren.

2.4 RÄUMUNG DER SEILBAHN

Im Normalfall benötigt eine Seilbahn neben dem Hauptantrieb, welcher in der Regel vom öffentlichen Stromnetz gespeist ist, einen zusätzlichen Notantrieb. Der Notantrieb dient dazu die Räumung der Seilbahn sicherzustellen bei einem Ausfall der Hauptenergieversorgung oder bei einem Defekt des Hauptantriebs. Unter dem Begriff Räumung der Seilbahn ist das Zurückführen der Fahrgäste in die Stationen nach einem Ereignisfall (Stromausfall, Ausfall Hauptantrieb) zu verstehen. Der Notantrieb dient im Allgemeinen nicht dazu, den normalen Fahrgastbetrieb der Seilbahn aufrechtzuerhalten. Die Energieversorgung des Notantriebs wird im Regelfall über einen Dieselmotor sichergestellt, welcher in der Antriebsstation untergebracht ist. Wie schon beim Projekt Biel – Magglingen, wurde auch beim Projekt Sierre – Montana das Ziel formuliert, das Energiespeichersystem bei Ausfall der Hauptenergieversorgung als Energiequelle für die Räumung der Seilbahn zu verwenden. Die folgende *Darstellung 2-6* zeigt das Prinzip der Lösung bei der Standseilbahn Biel – Magglingen. Bei Normalbetrieb ist das Energiespeichersystem mit dem Hauptantrieb und dem speisenden Stromnetz verbunden. Bei Ausfall der Hauptenergieversorgung, wird das Energiespeichersystem mit dem Notantrieb verbunden und dient als Energiequelle für den Notantrieb.



Darstellung 2-6: Prinzip Energieversorgung Standseilbahn Biel – Magglingen

Die Bedingung ist, dass das Energiespeichersystem inselnetzfähig ist, was bedeutet, dass das Energiespeichersystem bei Ausfall der Hauptenergieversorgung selbstständig ein 400 V-Inselnetz bilden kann. Nachteil dieser Lösung ist der zusätzliche Aufwand für die Umschaltung des Energiespeichersystems zwischen Hauptantrieb und Notantrieb. Diese Umschaltung muss so ausgeführt werden, dass auch bei einem Fehler innerhalb der Umschaltung immer noch irgendeine Umschaltmöglichkeit bestehen bleibt. Es darf nicht sein, dass ein einziger Fehler zur Folge hat, dass weder Hauptantrieb noch

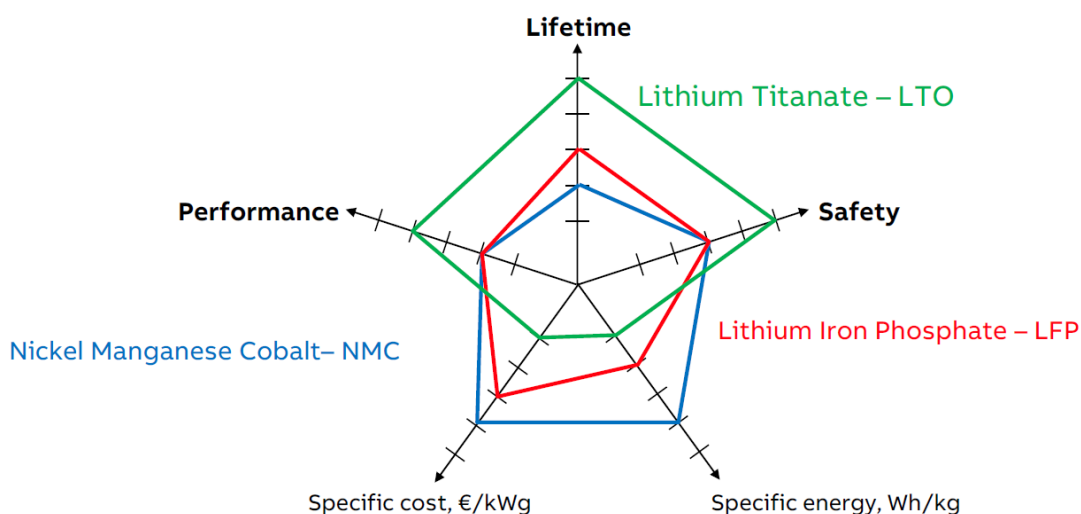
Notantrieb mit Energie versorgt werden können. Aus dieser Anforderung resultiert eine aufwändige Umschaltung, was zu zusätzlichen Kosten und zu zusätzlicher Komplexität führt.

Aufgrund der Erfahrungen beim Projekt Biel – Magglingen wurde für das Projekt Sierre – Montana das Ziel formuliert, dass eine neue Lösung ausgearbeitet werden muss, die keine solche Umschaltung notwendig macht.

3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

3.1 STANDARD ENERGIESPEICHERSYSTEM

In den letzten Jahren gab es im Bereich der elektrischen Energiespeicherung viele neue verschiedene Produkte auf dem Markt basierend auf verschiedenen Lithium-Batteriezellentechnologien. Die nachfolgende Darstellung zeigt einen Vergleich spezifischer Eigenschaften zwischen verschiedenen Technologien.



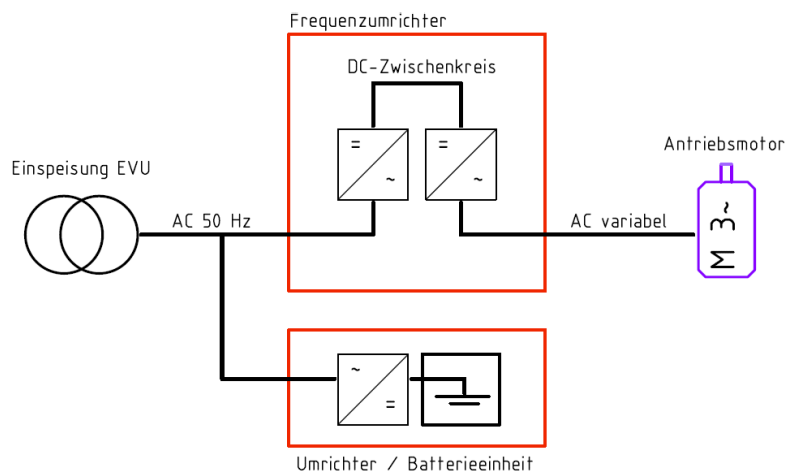
Darstellung 3-1: Vergleich zwischen verschiedenen Lithium-Batteriezellentechnologien

Aufgrund der spezifischen Kosten und der Energiedichte sind die meisten auf dem Markt erhältlichen Standard-Energiespeichersysteme mit Batterien basierend auf Lithium-NMC oder Lithium-LFP Zellen ausgerüstet. Im Normalfall sind mehrere Batteriemodule in Serie zu einem Batteriestring geschaltet. Je nach Energie- und Leistungsbedarf können mehrere Strings parallelgeschaltet werden. Der Batteriekreis ist Gleichspannung. Standard-Energiespeichersysteme sind aber für den direkten Anschluss an das 400 V-Wechselspannungsnetz konzipiert, weshalb zwischen dem Batteriekreis und dem Anschlusspunkt ein entsprechender Umrichter eingebaut ist. In Abhängigkeit von einem vorgegebenen Sollwert kann das elektrische Energiespeichersystem nun Energie beziehen aus dem 400 V-Wechselspannungsnetz und diese Energie in den Batterien speichern oder umgekehrt, Energie aus den Batterien beziehen und am 400 V-Wechselspannungsnetz abgeben. Meistens sind alle Komponenten, die zu einem elektrischen Energiespeichersystem gehören, in einem eigenen Schaltschrank eingebaut, was die folgende Darstellung 3-2 beispielhaft zeigt.



Darstellung 3-2: Industrielles Energiespeichersystem

Ein solches Standard-Energiespeichersystem wurde auch beim Projekt Standseilbahn Biel – Magglingen eingesetzt. Die folgende Darstellung 3-3 zeigt das grundlegende Prinzip der elektrischen Integration des Energiespeichersystems in die Energieversorgung der Seilbahn.

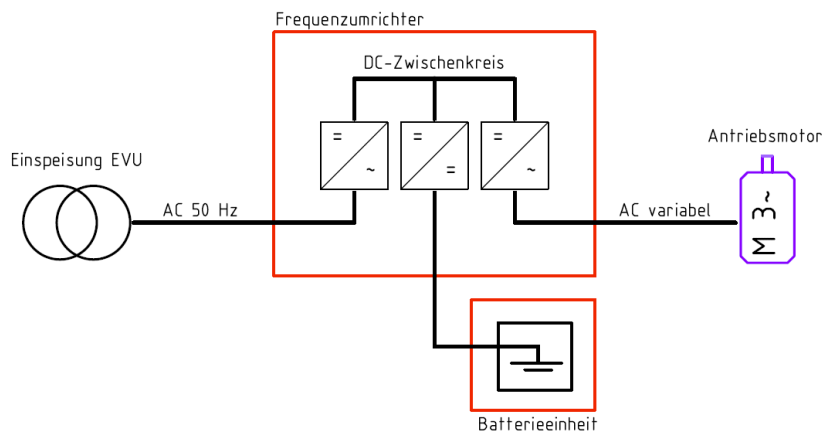


Darstellung 3-3: Integration Energiespeichersystem Projekt Biel - Magglingen

3.2 ENTWICKLUNG ESFOR

Während der Umsetzungszeit des Projekts Biel – Magglingen war es nicht möglich, eine Lösung basierend auf der Lithium-Titanat-Oxid-Technologie zu entwickeln. Die Umsetzungszeit des Projektes war kurz und es konnte in dieser Zeit keine passenden Komponenten für eine rasche Realisierung gefunden werden. Erst nach der Umsetzung des Projekts Biel – Magglingen hat ABB begonnen, basierend auf der LTO-Technologie Batteriemodule für Traktionsanwendungen zu produzieren und Frey Stans hat sich zum Ziel gesetzt, eine Energiespeicherlösung für Seilbahnen mit Pendelbetrieb basierend auf diesen Batteriemodulen zu realisieren.

Der Hauptfokus von ABB sind Traktionsanwendungen wie batteriebetriebene Züge oder Buse. Auf solchen Fahrzeugen erfolgt die Unterbringung der Batteriemodule nicht in herkömmlichen Industrie-Schaltschränken, sondern in speziellen fahrzeugtauglichen Gehäusen. Weiter hat sich Frey Stans das Ziel gesetzt, die Batterien über einen DC/DC-Wandler direkt mit dem Zwischenkreis des Frequenzumrichters zu verbinden, was auf der nachfolgenden Darstellung 3-4 ersichtlich ist. Man beachte den Unterschied zur Darstellung 3-3.



Darstellung 3-4: Integration Energiespeichersystem Projekt Sierre - Montana

Der Vorteil von dieser Lösung ist, dass die Batterie direkter mit dem Antriebsmotor verbunden ist. Überschüssige Bremsenergie fliesst via zwei Umrichter zur Batterie. Bei der Lösung gemäss Darstellung 3-3 sind drei Umrichter involviert, um anfallende Bremsenergie in der Batterie aufzunehmen. Da so weniger Verluste anfallen, kann durch diese Lösung die Effizienz des gesamten Systems verbessert werden. Da auf dem Markt keine ausgearbeitete Schaltschranklösung erhältlich war, um die Integration gemäss Darstellung 3-4 zu realisieren, hat sich Frey Stans entschieden, selber eine entsprechende Schaltschranklösung zu entwickeln.

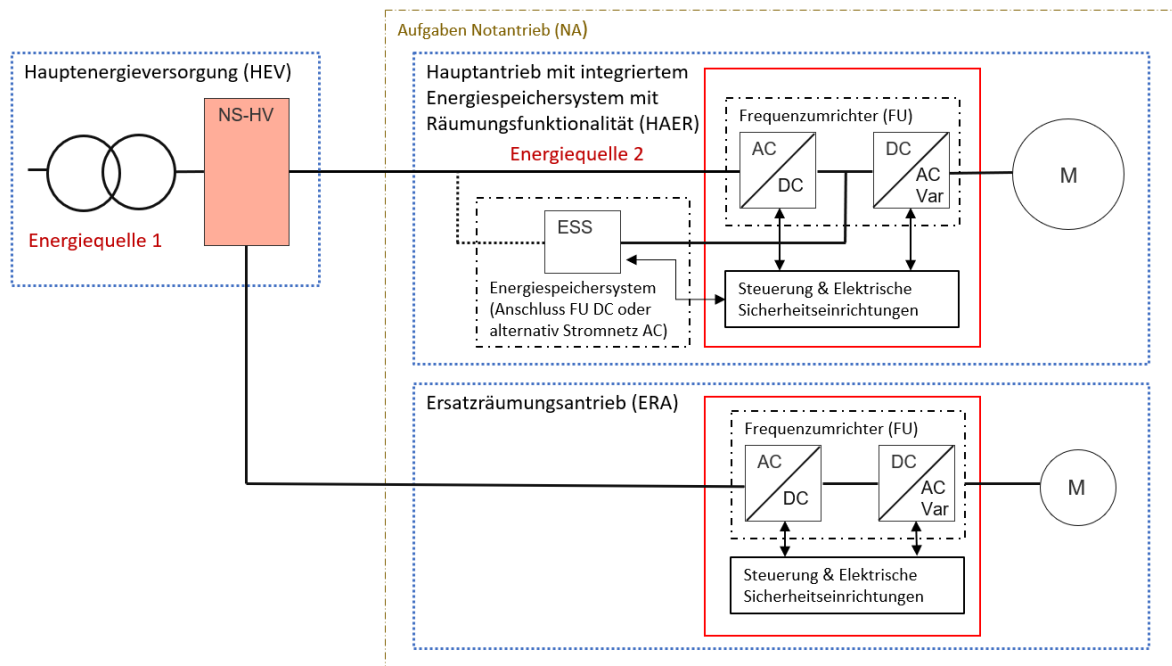
In einem ersten Schritt wurde anfangs 2020 ein Konzept ausgearbeitet, welches eingehend mit ABB besprochen wurde. In einem zweiten Schritt hat Frey Stans anhand des besprochenen Konzepts die Produktionsunterlagen für einen ersten Prototyp erstellt, welcher anschliessend im Jahr 2021 in der Werkstatt der Frey Stans produziert wurde. Anhand von diesem Prototyp-Schaltschrank konnte der gesamte Einbau der Komponenten optimiert und verbessert werden. Die entsprechenden Erkenntnisse sind anschliessend im Jahr 2022 in die Ausarbeitung und Produktion des Energiespeichersystems für die Standseilbahn Sierre – Montana eingeflossen. Wie die restlichen Schaltschränke der Seilbahn, wurde auch der Schaltschrank für das Energiespeichersystem in der Werkstatt der Frey Stans produziert. Parallel zur Hardware-Ausarbeitung fand die Entwicklung der Steuerungssoftware statt. Die Batteriemodule werden wassergekühlt, weshalb ein entsprechendes Kühlsystem ausgearbeitet wurde.

Von ABB wurden die Komponenten wie DC/DC-Wandler, Batteriemodule und die Strangkontrolleneinheiten mit dem eingebauten Batteriemanagement bezogen. ABB und Frey haben zusammen die grundlegenden Konzepte besprochen. Die Ausführung der Systemintegration - Integration der Komponenten zu einem funktionsfähigen Energiespeichersystem, das in einem industriellen Schaltschrank eingebaut ist - wurde durch Frey Stans, mit partieller Mithilfe von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter der Hochschule Luzern (HSLU), ausgeführt. Der Produktname der so entstandenen Lösung ist ESFOR, was für Energy Storage System for Ropeways steht.

Im Jahr 2021 wurde im Rahmen des Hochschullehrgangs «Seilbahnen – Engineering & Management, M.Sc.» an der Fachhochschule Vorarlberg von einem Mitarbeiter der Frey Stans eine Masterarbeit im Zusammenhang mit dem Einsatz von Energiespeichern bei Seilbahnen mit Pendelbetrieb durchgeführt. Der Kern dieser Masterarbeit ist ein Simulationsprogramm mit der Bezeichnung ESFORsim basierend auf den Berechnungs- und Simulationstools Matlab & Simulink. Das Energiemanagementsystem für die Seilbahn Sierre – Montana wurde anschliessend unter Mithilfe von diesem Simulationsprogramm erstellt und im Vorfeld simuliert. Das Simulationstool ESFORsim wurde aber unabhängig vom Projekt Sierre – Montana realisiert, weshalb es im Rahmen von diesem Bericht nicht weiter vertieft wird.

3.3 RÄUMUNG DER SEILBAHN ESRE

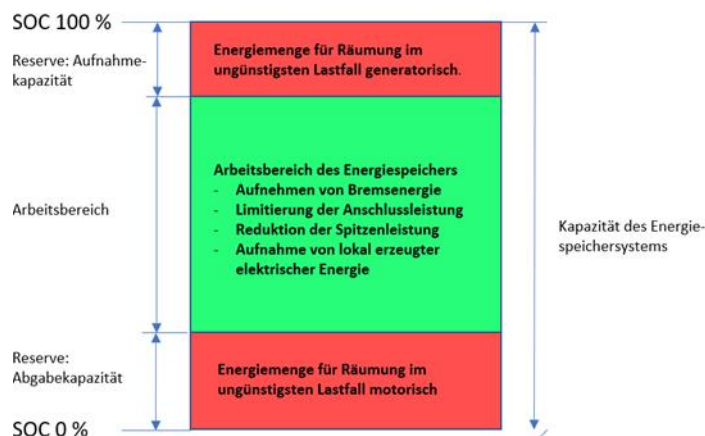
Wie in Kapitel 2.4 erwähnt, war das Ziel, die Räumung der Seilbahn im Zusammenhang mit dem Einsatz von einem Energiespeichersystem gegenüber der Lösung Biel – Magglingen zu verbessern. Im Jahr 2020 wurde deshalb durch Frey Stans in Zusammenarbeit mit dem Seilbahnbauer Garaventa und dem TÜV Süd ein neues Räumungskonzept für Seilbahnen mit integriertem Energiespeichersystem ausgearbeitet. Die Bezeichnung für dieses Räumungskonzept ist ESRE, was für Energy Storage supplied Recovery steht. Die nachfolgende Darstellung 3-5 zeigt das grundlegende Prinzip von diesem Konzept.



Darstellung 3-5: Prinzip Energieversorgung beim Räumungskonzept ESRE

Beim Räumungskonzept ESRE werden die Aufgaben des klassischen Notantriebs (NA), welche in Kapitel 2.4 beschrieben sind, auf den Hauptantrieb mit integriertem Energiespeichersystem (HAER) und den Ersatzräumungsantrieb (ERA) aufgeteilt. Bei Ausfall der Hauptenergieversorgung wird die Räumung der Seilbahn mit dem Hauptantrieb, gespeist ab dem Energiespeichersystem, sichergestellt. Bei einem technischen Ausfall des Hauptantriebs oder der Hauptantriebssteuerung, wird die Räumung der Seilbahn mit dem Ersatzräumungsantrieb, gespeist direkt ab der Hauptenergieversorgung (HEV), sichergestellt. Das Energiespeichersystem ist nur mit dem Hauptantrieb verbunden. Gegenüber der Lösung bei der Standseilbahn Biel – Magglingen entfällt die Umschaltung des Energiespeichersystems zwischen Haupt- und Notantrieb.

Damit die Räumung bei Ausfall der Hauptenergieversorgung mit dem Hauptantrieb, gespeist ab dem Energiespeichersystem, jederzeit sichergestellt werden kann, muss im Energiespeichersystem immer eine gewisse Energiemenge vorgehalten werden. Dies wird erreicht, indem bei Normalbetrieb nicht die gesamte zur Verfügung stehende Kapazität ausgenutzt wird. Die Reserve-Abgabekapazität wird so ausgelegt, dass genügend Energie zur Verfügung steht, um das Räumungsszenario im ungünstigsten Lastfall bergwärts (motorisch) sicherzustellen. Die Reserve-Aufnahmekapazität wird so ausgelegt, dass die beim Räumungsszenario im ungünstigsten Lastfall talwärts (generatorisch) auftretende Energiemenge im Speichersystem aufgenommen werden kann. Die nachfolgende Darstellung 3-6 zeigt das Prinzip der Aufteilung der Speicherkapazität.



Darstellung 3-6: Aufteilung Speicherkapazität bei ESRE

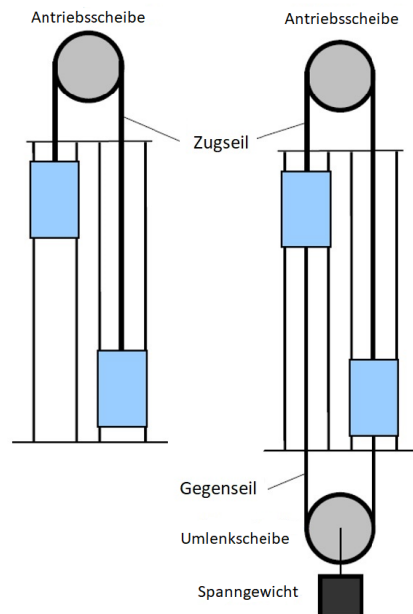
Das Räumungskonzept ESRE wurde im Jahre 2020 dem Bundesamt für Verkehr Sektion Seilbahnen vorgestellt. Anschliessend erfolgte die Eingabe der Plangenehmigungsunterlagen für das Projekt Sierre – Montana unter Berücksichtigung des ESRE-Konzepts.

3.4 DIMENSIONIERUNG ESFOR PROJEKT SIERRE – MONTANA

Beim Energiespeichersystem ESFOR kann projektspezifisch die Anzahl der parallelen Batteriestränge und die Auswahl des DC/DC-Wandlers bestimmt werden. Die optimale Anzahl Batteriemodule pro Batteriestrang ist technisch durch die nominale AC-Netzspannung des Seilbahnantriebs vorbestimmt. Wie in *Darstellung 2-2* ersichtlich, verfügt die Hauptenergieversorgung des Seilbahnantriebs eine nominale Spannung von 690 VAC. Die Zwischenkreisspannung des Frequenzumrichters ist abhängig von der nominalen AC-Netzspannung. Die maximal mögliche Batteriespannung bei ESFOR ist wiederum abhängig von der minimalen Zwischenkreisspannung. Aus den gegebenen Rahmendbedingungen resultiert, dass bei 690 VAC Netzspannung pro Strang zwölf Batteriemodule in Serie die optimale Strangauslegung ergeben. Zwölf Batteriemodule in Serie ergeben eine nominale Energiemenge pro Strang von 30 kWh. Als DC/DC-Wandler werden bei ESFOR Umrichter-Module aus der Produktlinie ACS880 von ABB eingesetzt. In der Schweiz werden bei Seilbahnen für den Frequenzumrichter des Hauptantriebs im Regelfall auch Umrichter-Module aus dieser Produktlinie eingesetzt. Je nach Leistungsbedarf können unterschiedliche Umrichter-Module eingesetzt werden oder bei grossen Leistungen können die Umrichter-Module auch parallelgeschaltet werden.

Die Dimensionierung des Energiespeichersystems für das Projekt Sierre – Montana erfolgte aus verschiedenen Gründen bereits bevor alle relevanten Einflussparameter bekannt waren. Zum Beispiel wusste Frey Stans zu diesem Zeitpunkt die Grösse der geplanten PV-Anlage nicht und weiter war zu diesem Zeitpunkt auch noch nicht klar, wie genau das ungünstigste Räumungsszenario bei der Anlage Sierre – Montana definiert wird. Betreffend Räumung war noch nicht geklärt, ob eine ganze Fahrt mit vollem Fahrzeug bergwärts und leerem Fahrzeug talwärts ab dem Energiespeichersystem sichergestellt werden muss, oder ob es reicht die Energiemenge für eine halbe Fahrt (oder sogar noch weniger) vorzuhalten. Wird für eine ganze Fahrt die Energiemenge vorgehalten, kann im Ereignisfall entschieden werden, mit welchem Seilbahnfahrzeug in welche Station gefahren wird. Wird z.B. nur die Energie für eine halbe Fahrt vorgehalten, kann im Ereignisfall mit den Seilbahnfahrzeugen nur in die nächstgelegene Station gefahren werden. Weiter war das Simulationsprogramm ESFORsim (siehe Kapitel 0) zum Zeitpunkt der Dimensionierung des Speichersystems für das Projekt Sierre – Montana noch nicht verfügbar.

Für das Projekt Sierre – Montana erfolgte die Auslegung des Energiespeichersystems ESFOR anhand von den damals bekannten technischen Gegebenheiten. Um möglichst im Verhältnis zur Leistung des Hauptmotors eine passende Leistung abdecken zu können, wurde als DC/DC-Wandler das leistungsfähigste Modul gewählt, welches zu diesem Zeitpunkt aus der Produktereihe ACS880 für eine DC/DC-Wandler-Anwendung verfügbar war. Wie vorangehend erwähnt, besteht ein Batteriestrang bei 690 V-Netzspannung aus zwölf Batteriemodulen in Serie und kann eine nominale Energiemenge von 30 kWh speichern. Die Anzahl Batteriestränge wurde abgeschätzt anhand des Energiebedarfs für eine Fahrt mit dem ungünstigsten Lastfall bergwärts. Für eine Fahrt mit einem vollen Fahrzeug bergwärts und einem leeren Fahrzeug talwärts werden rund 80 kWh Energie benötigt, ein Wert der anhand der Seilrechnung des Seilbahnbauers Garaventa im Voraus ermittelt werden kann. Im Vergleich zur Standseilbahn Biel – Magglingen (ca. 16 kWh) ist der Energiebedarf für eine Fahrt im ungünstigsten Lastfall bergwärts bei der Standseilbahn Sierre – Montana aufgrund der grösseren Höhendifferenz, der längeren und kurvenreicheren Fahrstrecke und der zusätzlichen Reibung des Gegenseils bedeutend grösser. Die Standseilbahn Sierre – Montana besitzt, im Gegensatz zur Standseilbahn Biel – Magglingen, aufgrund von seilbahntechnischen Anforderungen ein Gegenseil. Dieses Gegenseil verursacht zusätzliche Reibung, was aus energetischer Sicht ein Nachteil ist. Die nachfolgende Darstellung 3-7 zeigt den Unterschied zwischen einer Standseilbahn mit und ohne Gegenseil.



Darstellung 3-7: Prinzip Seilführung Standseilbahn

Um energetisch alle denkbaren Räumungsvarianten abzudecken, wurden bei der Dimensionierung von ESFOR für die Standseilbahn Sierre – Montana vier parallele Strings gewählt. Da ein String eine nominale Energie von 30 kWh speichern kann, können vier parallele Strings eine nominale Energie von 120 kWh speichern. Die nachfolgende *Darstellung 3-8* zeigt in tabellarischer Form zusammengefasst die resultierende Dimensionierung des Energiespeichersystems ESFOR für die Standseilbahn Sierre – Montana.

Darstellung 3-8: Kenngrössen Energiespeichersystem Standseilbahn Sierre - Montana

Grösse	Wert
Nominale Energie	120 kWh
Nominale Kapazität	184 Ah
Nominale Leistung	240 kW
Maximale Leistung	380 kW

Zu erwähnen ist, dass bei dieser Dimensionierung die technische Betrachtung stärker gewichtet wurde als ökonomische Überlegungen. Das Ziel war, das Energiespeichersystem technisch möglichst so zu dimensionieren, dass man während der Projektphase möglichst flexibel auf die zur Zeit der Dimensionierung noch nicht genau bekannten Einflussparameter reagieren kann.

4. Ergebnisse

4.1 ENERGIESPEICHERSYSTEM ESFOR

Die von Frey Stans entwickelte Energiespeicherlösung ist komplett in den Seilbahnantrieb und die Seilbahnsteuerung integriert. Dieses Energiespeichersystem ist Teil der elektrischen Einrichtungen der Seilbahn und ist soweit wie möglich mit den gleichen oder ähnlichen Komponenten aufgebaut wie der Rest der elektrischen Einrichtungen der Seilbahn. Gesteuert wird das System über eine Speicher-Programmierbare-Steuerung (SPS), welche mit den restlichen SPS-Geräten der Seilbahnsteuerung vernetzt ist. Die Bedienung des Energiespeichersystems erfolgt im Allgemeinen über die Bedieneinrichtungen der Seilbahn. Die Visualisierung des Energiespeichersystems ist in die Visualisierung der Seilbahn integriert.

Abgesehen von der Wasserkühlung sind alle für ESFOR benötigten Komponenten in einem eigenen handelsüblichen Schaltschrank eingebaut. Die nachfolgende Abbildung 4-1 zeigt den ESFOR-Schaltschrank der Seilbahn Sierre - Montana.



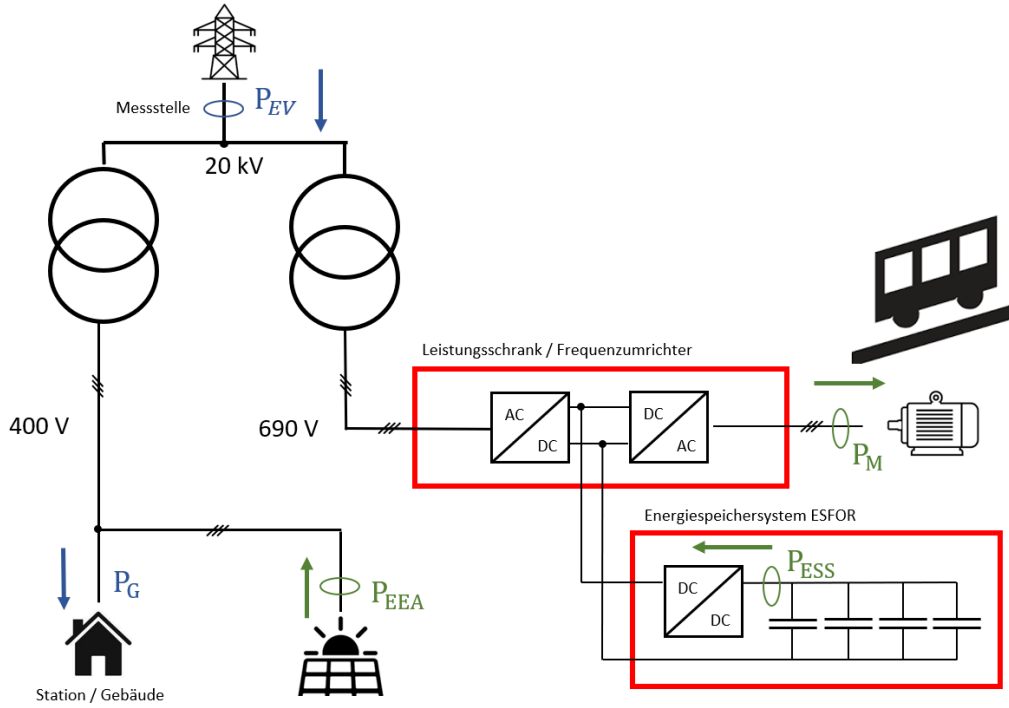
Abbildung 4-1 ESFOR Schaltschrank

Im ersten Schrankfeld von links sind ein Trennschalter, der Kabelanschluss für das Verbindungskabel zum Frequenzumrichter sowie verschiedene für ESFOR benötigte Steuerungskomponenten wie z.B. die Regelungseinheit für den DC/DC-Wandler eingebaut. Im zweiten Schrankfeld von links befindet sich der DC/DC-Wandler und die dazugehörigen Sicherungen. In den weiteren Schrankfeldern ist pro Schrankfeld ein Batteriestrang eingebaut. Bei der Seilbahn Sierre – Montana besteht ein Batteriestrang aus zwölf in Serie geschalteten Batteriemodulen sowie einer Strang-Kontrolleinheit.

Auch das Energiemanagement (EMS), welches den Leistungssollwert für das Energiespeichersystem bestimmt, ist Teil der Seilbahnsteuerung und wird auf einer SPS der Seilbahnsteuerung ausgeführt. Basis für das EMS sind aktuelle Leistungswerte, welche messtechnisch durch das System erfasst werden (siehe *Darstellung 4-2*).

4.2 ENERGETISCHE ANALYSE

Die nachfolgende *Darstellung 4-2* zeigt die realisierte Integration von PV-Anlage und Energiespeichersystem ESFOR. Die PV-Anlage hat eine Leistung von 62 kWp. Zu beachten ist der Einspeisepunkt der PV-Anlage. Ursprünglich war geplant, die PV-Anlage möglichst direkt beim Seilbahnantrieb anzuschliessen (siehe *Darstellung 2-1*). Dies hätte aber einen zusätzlichen Transformator 400 V/690 V für die PV-Anlage benötigt, da eine normale PV-Anlage (Wechselrichter) für eine Netzspannung von 400 V ausgelegt ist. Verschiedene Gründe haben dazu geführt, dass während dem Projektverlauf der Einspeisepunkt der PV-Anlage geändert wurde.



Darstellung 4-2: Betrachtetes Energiesystem und Vorzeichenkonvention

Auf der *Darstellung 4-2* sind die für das EMS und für die energetische Analyse relevanten Leistungswerte dargestellt. Anhand der aktuellen Leistung der PV-Anlage (P_{EEA}), der aktuellen Leistung des Seilbahnmotors (P_M) bestimmt das EMS die Leistung des Energiespeichersystems (P_{ESS}). Nicht bekannt aus Sicht EMS ist die aktuelle Leistungsaufnahme des Gebäudes (P_G) sowie die aktuelle Leistung der Energieversorgung (P_{EV}) auf der Mittelspannungsseite (Leistung öffentliches Stromnetz an der EVU-Messstelle), da im Moment keine entsprechende Messeinrichtungen vorhanden sind, auf deren aktuellen Werte das EMS zugreifen könnte. Mit Pfeilen dargestellt ist die in diesem Bericht verwendete Vorzeichenkonvention. Fließt die Energie in Pfeilrichtung, ist die entsprechende Leistung positiv. Die Leistungswerte P_M , P_{EEA} und P_{ESS} werden längerfristig gespeichert. Anhand dieser gespeicherten Werte, wurde die nachfolgende energetische Analyse durchgeführt.

Die folgenden Formeln zeigen formal die durchgeführte Auswertung. Die im betrachteten Energiesystem über eine bestimmte Zeit Δt verbrauchte Energie E_{VB} kann gemäss Formel (4-1) bestimmt werden. P_M^+ steht dabei für die positive Motorenleistung, welche einen Energiefluss vom Frequenzumrichter zum Motor hin zur Folge hat.

$$E_{VB} = \int_{t1}^{t1+\Delta t} P_M^+(t) * dt + \int_{t1}^{t1+\Delta t} P_{AV}(t) * dt \quad (4-1)$$

Die Leistung des allgemeinen Verbrauchs P_{AV} , Formel (4-2), setzt sich zusammen aus der Leistung des Gebäudes P_G und der gesamten Verlustleistung P_V .

$$P_{AV} = P_G + P_V \quad (4-2)$$

Die nächste Formel (4-3) zeigt die Ermittlung der während der Zeitperiode Δt im betrachteten Energiesystem produzierten Energie E_{PR} . P_M^- steht dabei für die negative Motorenleistung, welche einen Energiefluss vom Motor zum Frequenzumrichter hin zur Folge hat (Bremsen).

$$E_{PR} = \int_{t1}^{t1+\Delta t} P_M^-(t) * dt + \int_{t1}^{t1+\Delta t} P_{EEA}(t) * dt \quad (4-3)$$

Die Leistung der öffentlichen Energieversorgung (Stromnetz) am Verrechnungspunkt P_{EV} kann gemäss Formel (4-4) bestimmt werden.

$$P_{EV} = (P_M(t) + P_{AV}(t) - P_{ESS}(t) - P_{EEA}(t)) \quad (4-4)$$

Die während der Zeitperiode Δt ins Stromnetz zurückgespeiste Energie E_{EV}^- kann gemäss der folgenden Formel (4-5) bestimmt werden. Ausgangsgrösse ist die negative Leistung P_{EV}^- . Ein negativer Wert bedeutet, gemäss der hier verwendeten Vorzeichenkonvention (siehe *Darstellung 4-2*), einen Energiefluss zurück ins Stromnetz (Rückspeisung).

$$E_{EV}^- = \int_{t1}^{t1+\Delta t} P_{EV}^-(t) * dt \quad (4-5)$$

Die Formel (4-6) zeigt die Bestimmung des Eigendeckungsgrades (Autarkiegrad) a . Der Eigendeckungsgrad sagt aus, welcher prozentuale Anteil, der in einer bestimmten Zeitdauer verbrauchten Energie, in diesem Zeitraum vor Ort erzeugt wurde.

$$a = \frac{E_{PR} - E_{EV}^-}{E_{VB}} * 100 \quad (4-6)$$

Die Formel (4-7) zeigt die Bestimmung der Eigenverbrauchsrate e . Die Eigenverbrauchsrate sagt aus, wieviel von der in einem lokalen Energiesystem während einer bestimmten Zeitdauer produzierten Energiemenge in diesem lokalen Energiesystem während diesem Zeitraum verbraucht wurde.

$$e = \frac{E_{PR} - E_{EV}^-}{E_{PR}} * 100 \quad (4-7)$$

Der Energieverbrauch des Seilbahnmotors E_M^+ wird gemäss Formel (4-8) bestimmt.

$$E_M^+ = \int_{t1}^{t1+\Delta t} P_M^+(t) * dt \quad (4-8)$$

Die vom Seilbahnmotor erzeugte Energie E_M^- (Bremsenergie) lässt sich mit Formel (4-9) bestimmen.

$$E_M^- = \int_{t1}^{t1+\Delta t} P_M^-(t) * dt \quad (4-9)$$

Der Eigendeckungsgrad a_m bezogen nur auf den Seilbahnmotor kann gemäss Formel (4-10) bestimmt werden.

$$a_m = \frac{E_{PR} - E_{EV}^-}{E_M^+} * 100 \quad (4-10)$$

Da die aktuelle Leistung des Gebäudes P_G sowie die Verlustleistung P_V nicht messtechnisch vorliegen, wird im Rahmen dieser Analyse ein konstanter allgemeiner Verbrauch P_{AV} von 40 kW berücksichtigt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die aus den Messdaten und dem Konstanten Wert P_{AV} resultierenden Ergebnisse für ein paar ausgewählte Tage im Juni 2024. Die Bedeutung der einzelnen Formelzeichen (Spaltenbezeichnungen) ist vorangehend beschrieben.

Darstellung 4-3: Energetische Analyse für ein paar ausgewählte Tage

Datum	E_{VB} [kWh]	E_{PR} [kWh]	a [%]	e [%]	E_M^+ [kWh]	E_M^- [kWh]	a_m [%]
01.06.2024	2529.2	542.6	21.5	100	1569.2	196.1	34.6
02.06.2024	2561.4	303	11.8	100	1601.4	188	18.9
03.06.2024	2693	470.6	17.5	100	1733	215.6	27.2
04.06.2024	2584.7	622.3	24.1	100	1624.7	210.9	38.3
05.06.2024	2500.7	638.3	25.5	100	1540.7	207.5	41.4
06.06.2024	2534.2	460.6	18.2	100	1574.2	198.6	29.3
07.06.2024	2533.9	461.3	18.2	100	1573.9	201.2	29.3
08.06.2024	2525.1	389.2	15.4	100	1565.1	204	24.9
09.06.2024	2496.6	463.4	18.6	100	1536.6	206.7	30.2
10.06.2024	2534.9	552.2	21.8	100	1574.9	200	35.1
11.06.2024	2545.6	450.4	17.7	100	1585.6	198.2	28.4
12.06.2024	2554.5	542.2	21.2	100	1594.5	195.1	34
13.06.2024	2560.7	645.5	25.2	100	1600.7	195.7	40.3
14.06.2024	2550.8	349.5	13.7	100	1590.8	197.5	22
15.06.2024	2561.3	383.6	15	100	1601.3	190	24
16.06.2024	2517.1	586.5	23.3	100	1557.1	200.1	37.7
17.06.2024	2511.9	557.5	22.2	100	1551.9	204.6	35.9
18.06.2024	2502.9	631.8	25.2	100	1542.9	207.8	40.9
19.06.2024	2487.8	586.9	23.6	100	1527.8	210.7	38.4
20.06.2024	2541.9	334.4	13.2	100	1581.9	201.2	21.1

Für die energetische Analyse wurden ein paar Tage im Juni 2024 gewählt. Zu bemerken ist, dass der Juni 2024 nicht sehr sonnig war und somit der Ertrag der PV-Anlage im Allgemeinen keine Spitzenwerte erreichte. Der von der PV-Anlage produzierte Energiebetrag E_{EEA} kann gemäss Formel (4-11) aus der produzierten Energie E_{PR} und der Bremsenergie E_M^- berechnet werden.

$$E_{EEA} = E_{PR} - E_M^- \quad (4-11)$$

Unter der Annahme von einem konstanten allgemeinen Verbrauch P_{AV} von 40 kW und einem einiger-massen konstanten Fahrgastaufkommen können die Werte E_{VB} (Energieverbrauch Gesamtsystem), E_M^+ (Energieverbrauch Seilbahnmotor), und E_M^- (Energieproduktion Seilbahnmotor, Bremsenergie) gemittelt und auf ein Monat und auf ein Jahr hochgerechnet werden. Nicht zulässig ist dies für den Wert der Energieproduktion E_{PR} , da die Produktion der PV-Anlage, welche darin enthalten ist, nicht über das gesamte Jahr gleich hoch ausfällt. Unter der Annahme von 1200 Volllaststunden resultiert bei einer PV-Anlage mit 62 kWp einen Jahresertrag von rund 80'000 kWh. Daraus resultiert ein durchschnittlicher Ertrag pro Tag von 219 kWh. Mit einer durchschnittlichen Bremsenergie von ca. 201 kWh pro Tag resultiert eine durchschnittliche Produktion E_{PR} von 420 kWh pro Tag. Die nachfolgende *Darstellung 4-4* zeigt die daraus resultierenden durchschnittlichen Werte pro Tag sowie die auf ein Monat und ein Jahr hochgerechneten Werte unter der Annahme von 365 Betriebstagen.

Darstellung 4-4: Energetische Analyse, durchschnittliche Werte

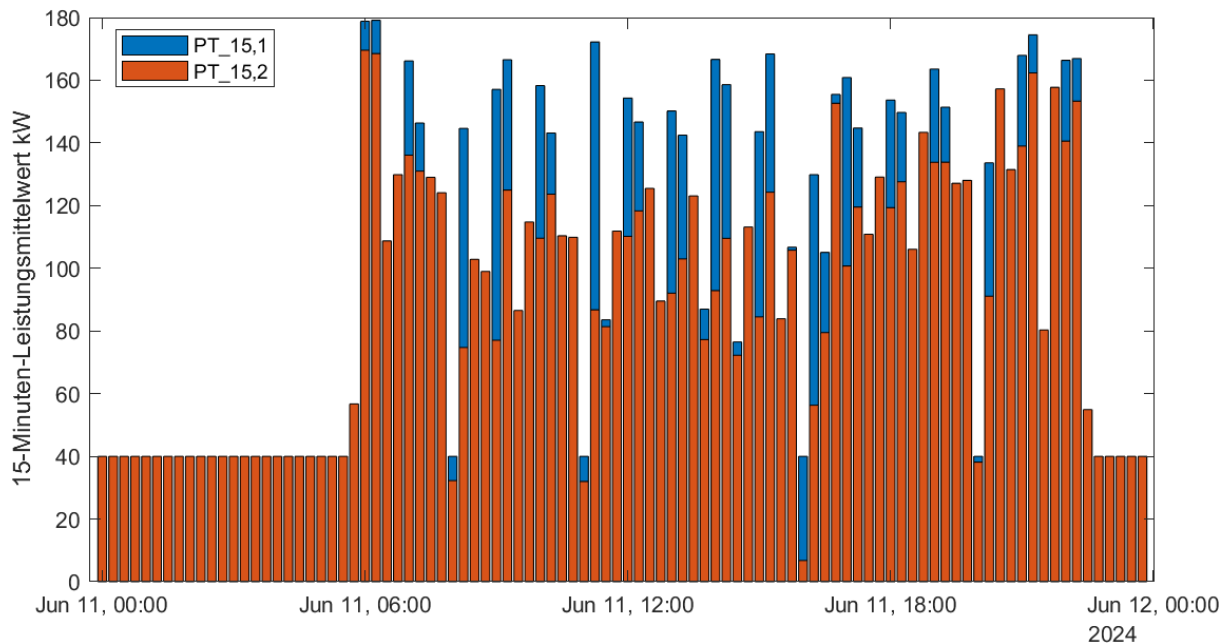
Datum	E_{VB} [kWh]	E_{PR} [kWh]	a [%]	e [%]	E_M^+ [kWh]	E_M^- [kWh]	a_m [%]
Tag	2539	420	16.5	100	1579	201	26.6
Monat	78709	13020	16.5	100	48949	6231	26.6
Jahr	926735	153300	16.5	100	576335	73365	26.6

4.3 15-MINUTEN-LEISTUNGSSPITZENWERT

Die nachfolgende Formel (4-12) zeigt formal die Ermittlung des 15-Minuten-Leistungsmittelwerts $P_{PT,15}$. Ausgangsgrösse für die Bestimmung von diesem Mittelwert ist der positive Anteil der Leistung der Energieversorgung (Stromnetz) P_{EV}^+ am Verrechnungspunkt (siehe auch Formel (4-4)).

$$P_{PT,15} = \frac{\int_{ta}^{ta+15min} P_{EV}^+(t) * dt}{15min} \quad (4-12)$$

Bei der Berechnung des 15-Minuten-Leistungsmittelwerts ist das Zeitintervall immer 15 Minuten und der Endzeitpunkt der Berechnung ist XX:00, XX:15, XX:30 und XX:45. Das Formelzeichen ta steht somit für den Endzeitpunkt weniger 15 Minuten. Die nachfolgende *Darstellung 4-5* zeigt die 15-Minuten-Leistungsmittelwerte für einen ausgewählten Tag im Juni 2024. Es sind die 15-Minuten-Leistungsmittelwerte unter Berücksichtigung der PV-Anlage und des Energiespeichersystems ersichtlich ($P_{PT,15,2}$), sowie die Werte ohne Berücksichtigung von PV-Anlage und Energiespeichersystem ($P_{PT,15,1}$). Für die Bestimmung des Werts $P_{PT,15,1}$ wurden in Formel (4-4) die Anteile P_{ESS} und P_{EEA} auf Null gesetzt.



Darstellung 4-5 15-Minuten-Leistungsmittelwert 11. Juni 2024

Zu beachten ist, dass für die Verrechnung der höchste 15-Minuten-Leistungsmittelwert innerhalb von einer Betrachtungsperiode massgebend ist. Häufig ist die Betrachtungsperiode monatlich, was bedeutet, dass der höchste Wert pro Monat für die Verrechnung ausschlaggebend ist.

4.4 RÄUMUNG DER SEILBAHN

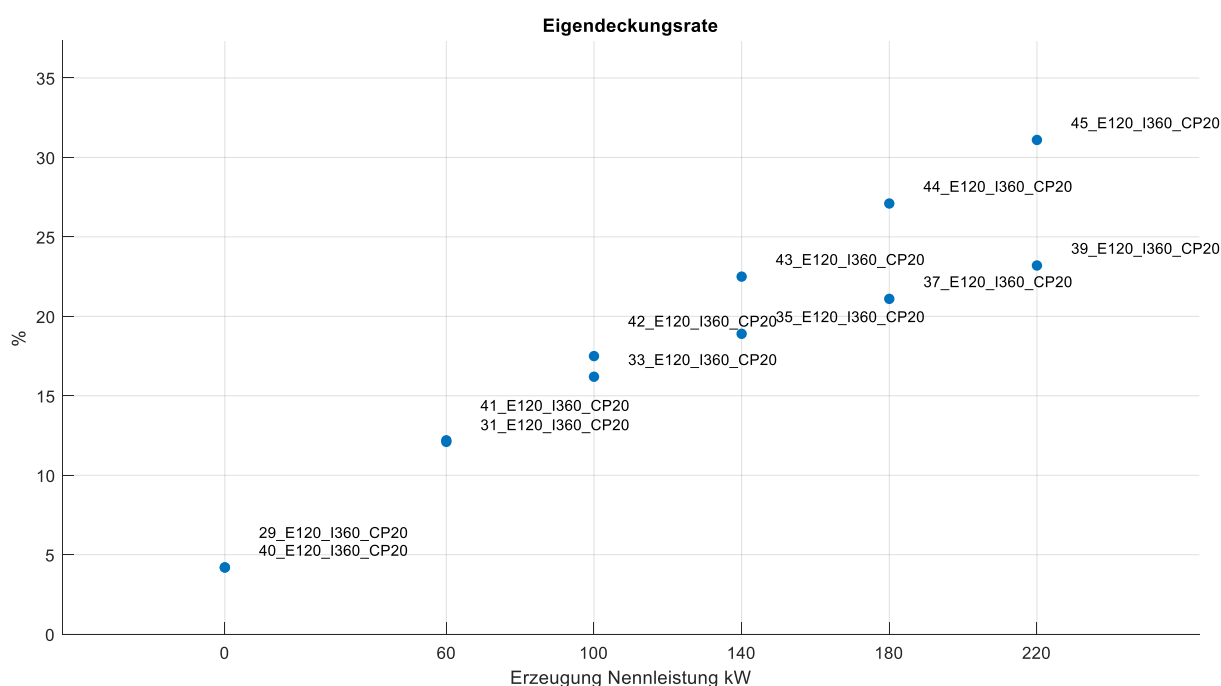
Bei der Standseilbahn Sierre – Montana wird die Räumung der Seilbahn bei Ausfall der Hauptenergieversorgung mit dem Energiespeichersystem sichergestellt (siehe Kapitel 2.4 und 3.3). Das aktuelle Räumungsszenario bezogen auf den Ausfall der Hauptenergieversorgung sieht vor, dass bei Ausfall der

Hauptenergieversorgung mit der Bahn auch in den ungünstigsten Lastsituationen (voll auf / leer ab oder leer auf / voll ab) noch mindestens eine halbe Fahrt, zurückfahren in die nähergelegene Endstation, gemacht werden kann. Entsprechend sind die Reserve-Aufnahmekapazität und die Reserve-Abgabekapazität (siehe Kapitel 3.3) bestimmt worden. Aufgrund der langen Fahrstrecke der Seilbahn und des daraus resultierenden hohen Energiebedarfs für eine halbe Fahrt wird deshalb ein relevanter Teil der verwendbaren Kapazität des Energiespeichersystems für die Räumung reserviert und kann deshalb nicht für andere Anwendungsziele eingesetzt werden.

4.5 SIMULATION

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, erfolgte die Dimensionierung des Energiespeichersystems für das Projekt Standseilbahn Sierre – Montana nicht mithilfe von einem Simulationstool, da Frey Stans zu diesem Zeitpunkt noch kein Simulationstool zur Verfügung hatte (siehe Kapitel 0). Jetzt steht das Simulationstool ESFORsim zur Verfügung, um den Einsatz von Energiespeichersystemen bei Seilbahnen mit Pendelbetrieb besser zu analysieren. Mit ESFORsim können aussagekräftige Referenztage simuliert werden. Jeder Referenztag basiert auf einem bestimmten Szenario (Fahrgastaufkommen, Fahrplan, Ertrag PV-Anlage). Die Ergebnisse der Referenztage werden hochgerechnet auf ein Jahr, um am Schluss Ergebnisse pro Jahr zu erhalten. Die Referenztage können mit unterschiedlichen Speichergrossen und unterschiedlichen PV-Anlagen durchgeführt werden. Im Rahmen von diesem Bericht wurde nun auch die Standseilbahn Sierre – Montana, unter Berücksichtigung des realisierten Energiespeichersystems ESFOR, nachträglich mit ESFORsim analysiert. Die entsprechenden Ergebnisse basieren auf den simulierten Referenztagen. Die Szenarien für diese Referenztage wurden durch Frey Stans bestimmt.

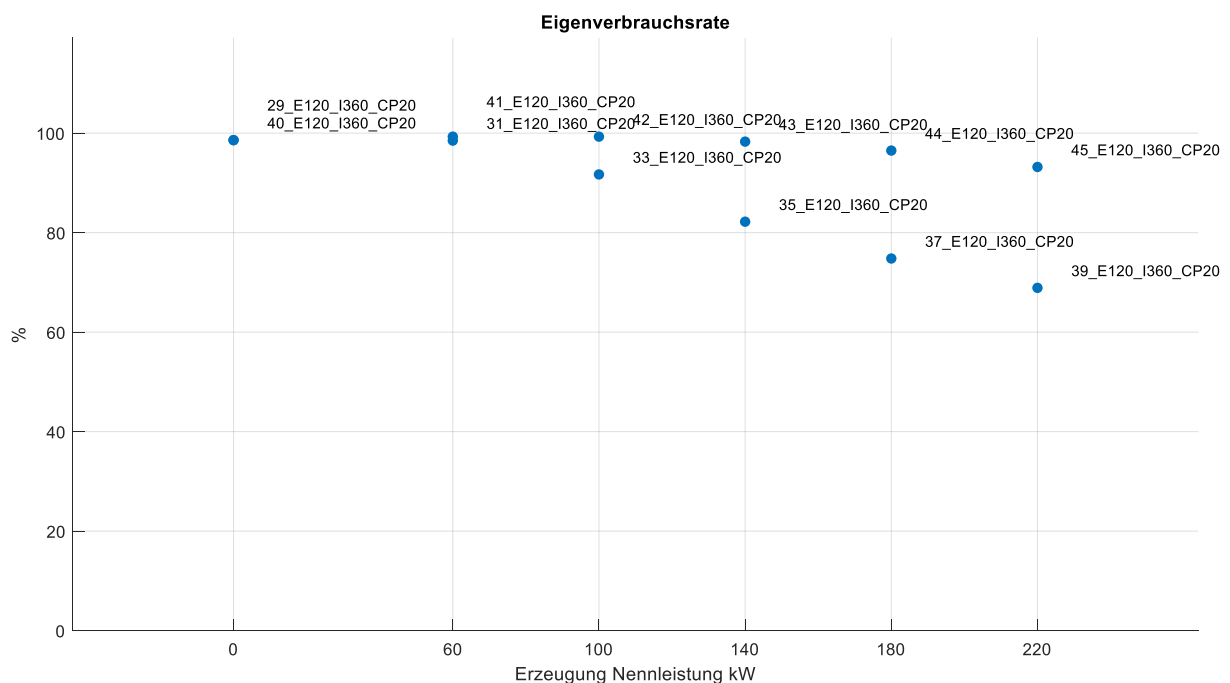
Die nachfolgenden Darstellungen zeigen die relevanten Simulationsergebnisse. Jeder Punkt bezieht sich auf ein ganzes Betriebsjahr. Jeder Punkt besitzt eine Kennzeichnung wie z.B. 33_E120_I360_CP20. Die erste Zahl, im erwähnten Beispiel 33, steht für den Simulationsdurchgang. Die Simulationsdurchgänge 29, 31, 33, 35, 37, 39 wurden mit dem aktuell vorhandenen Speichersystem (Technische Daten siehe Kapitel 3.4) und unter Berücksichtigung des aktuellen Räumungsszenarios (Kapitel 4.4) durchgeführt. Der Unterschied zwischen diesen verschiedenen Simulationsdurchgängen (29-39) ist nur die Grösse der berücksichtigten PV-Anlage (Erzeugung Nennleistung kW). Der Simulationsdurchgang 31 entspricht in etwa der aktuell realisierten Lösung (Simulation PV-Anlage 60 kWp / vor Ort realisiert 62 kWp). Die Simulationsdurchgänge 40, 41, 42, 43, 44, und 45 sind ohne Berücksichtigung der Räumung. Bei diesen Simulationsdurchgängen ist also keine Reserve-Abgabekapazität und keine Reserve-Aufnahmekapazität (siehe Kapitel 3.3) vorhanden. Das Energiespeichersystem wird bei diesen Simulationsdurchgängen vollumfänglich für die Zwischenspeicherung von Energie verwendet. Der Unterschied zwischen diesen Simulationsdurchgängen (40-45) ist wiederum die Grösse der PV-Anlage.



Darstellung 4-6: Simulationsergebnis Eigendeckungsrate

Darstellung 4-6 zeigt, wie sich die Eigendeckungsrate in Abhängigkeit der Grösse der PV-Anlage verändert. Ohne PV-Anlage beträgt die Eigendeckungsrate etwas weniger als 5 %. Dies entspricht der Bremsenergie, welche dank dem Energiespeichersystem zwischengespeichert und wiederverwendet werden kann. Dank der PV-Anlage von rund 60 kWp erhöht sich die Eigendeckungsrate auf ca. 12.5 %.

Darstellung 4-7 Simulationsergebnis Eigenverbrauchsrate zeigt die Eigenverbrauchsrate. Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass bei der aktuellen realisierten Situation (Simulationsdurchgang 31) die Eigenverbrauchsrate bei rund 100 % liegt, was bedeutet, dass keine Energie ins speisende Stromnetz zurückgespeist wird. Die gesamte lokal im betrachteten Energiesystem produzierte Energie kann lokal in diesem Energiesystem verwendet werden. Weiter ist ersichtlich (Simulationsdurchgänge 33, 35, 37, 39), dass bei einer Vergrösserung der PV-Anlage und unter Berücksichtigung der aktuellen Aufnahme- und Abgabe-Reserve-Kapazitäten (siehe Kapitel 4.4) nicht mehr alle überschüssige Energie zwischengespeichert werden kann, was bedeutet, dass ein gewisser Anteil der im betrachteten Energiesystem produzierten Energie ins speisende Stromnetz zurückgespeist wird. Werden keine Aufnahme- und Abgabe-Reserve-Kapazitäten mehr berücksichtigt, nimmt die zum zwischenspeichern von Energie verwendbare Kapazität des Speichersystems zu, was zur Folge hat, dass bei allen betrachteten PV-Nennleistungen die Eigenverbrauchsrate grösser 90 % ist (Simulationsdurchgänge 41-45).



Darstellung 4-7 Simulationsergebnis Eigenverbrauchsrate

Zu erwähnen ist, dass sich die dargestellten Resultate auf die simulierten Szenarien beziehen. Je genauer ein simuliertes Szenario der Realität entspricht, desto genauer sind die entsprechenden Resultate. Bei den hier simulierten Szenarien sind der allgemeine Verbrauch P_{AV} sowie das Fahrgastaufkommen (zu welcher Zeit wie viele Leute bergwärts und zu welcher Zeit wie viele Leute talwärts fahren) durch Frey Stans abgeschätzt worden. Vor allem die Leistung P_G (siehe Formel (4-2)) ist unbekannt. Auch ist nicht bekannt, was überhaupt alles für Verbraucher am Gebäude-Transformator angeschlossen sind. Bei allen Auswertungen und Simulationen in diesem Kapitel wurde ein konstanter allgemeiner Verbrauch P_{AV} von 40 kW angenommen. Weiter ist die in der Simulation berücksichtigte PV-Anlage aus Sicht Jahresertrag optimal für den Standort ausgerichtet, was nicht zwingend genau den realen Bedingungen entsprechend muss. Die Ergebnisse der Simulation beziehen sich auf 365 Betriebstage. Betriebsunterbrüche wurden nicht berücksichtigt. Es ist zu vermerken, dass beim simulierten Szenario ein leicht höherer Jahresverbrauch resultierte als gemäss Hochrechnung in *Darstellung 4-4*. Die lässt sich erklären aus dem angenommenen Fahrgastaufkommen, welches in der Simulation aus Sicht Energieverbrauch im Allgemeinen ungünstiger angenommen wurde, als es an den durchschnittlichen Tagen im Juni 2024 vorherrschte. Aus diesem Grund sind die Werte in *Darstellung 4-6* eher konservativer (tiefer) gegenüber dem Wert in *Darstellung 4-4*. Zudem ist die realisierte PV-Anlage mit 62 kWp grösser als die bei Simulationsdurchgang 31 und 41 simulierte PV-Anlage mit 60 kWp, was auch einen Einfluss auf die

Eigenverbrauchsrate hat. Diese zwei Punkte erklären die Differenz zwischen der simulierten Eigenverbrauchsrate (ca. 12.5 %) und der hochgerechneten Eigenverbrauchsrate (16 %).

5. Diskussion

Bei der Standseilbahn Sierre – Montana wurde das Energiespeichersystem ESFOR zum ersten Mal eingesetzt. Gegenüber einem herkömmlichen Industrie-Energiespeichersystem ist ESFOR bedeutend leistungsfähiger im Verhältnis zur Kapazität. Weiter ist ESFOR vollumfänglich in die elektrischen Einrichtungen der Seilbahn integriert und diverse Komponenten, welche bei ESFOR eingesetzt sind, werden auch für andere Anwendungen bei den elektrischen Einrichtungen der Seilbahn eingesetzt, was ein Vorteil aus Sicht Ersatzteilhaltung darstellt. Bestandteil des Energiespeichersystems ESFOR ist eine Wasserkühlung, welche eine optimale Kühlung der Batteriemodule sicherstellt, was einen positiven Einfluss auf deren Lebensdauer hat. Gegenüber einer Luftkühlung bringt dies den Vorteil, dass die Temperatur des Kühlmediums unabhängiger von der Temperatur der Luft im Aufstellungsraum ist. ESFOR kann somit auch in Räumen eingebaut werden, welche aufgrund der hohen Innenraumtemperaturen nicht geeignet sind als Aufstellungsraum von luftgekühlten Batteriesystemen.

5.1 EIGENVERBRAUCHSRATE

Die Auswertung in Kapitel 4.2 zeigt, dass dank ESFOR die gesamte im betrachteten Energiesystem produzierte Energie auch in diesem Energiesystem verbraucht wird, was eine Eigenverbrauchsrate von 100 % zur Folge hat. Verbrauch und Produktion stimmen zeitlich nicht immer überein, was durch das Energiespeichersystem ESFOR ausgeglichen wird (siehe Erläuterungen in Kapitel 2.2). Zu bemerken ist, dass sich die Auswertungen in Kapitel 4.2 nur auf einen bestimmten Zeitbereich beziehen. Die Simulationsergebnisse in Kapitel 4.4, welche sich auf ein ganzes Betriebsjahr beziehen, zeigen aber auch, dass die Eigenverbrauchsrate bezogen auf ein ganzes Betriebsjahr bei rund 100 % liegt.

5.2 ALLGEMEINER VERBRAUCH

Simulation wie Auswertung in Kapitel 4.2 basieren aber auf der Annahme von einem konstanten allgemeinen Verbrauch P_{AV} (siehe Formel (4-2)) von 40 kW, was nicht genau der Realität entsprechen kann. Dieser zusätzliche Verbrauch wird aktuell messtechnisch nicht erfasst und ist kaum konstant. Da kein entsprechender Messwert vorliegt, arbeitet auch das Energiemanagement aktuell mit einem konstanten Wert, was dazu führen kann, dass die Ansteuerung des Energiespeichersystems nicht immer optimal erfolgt. Der allgemeine Verbrauch P_{AV} beinhaltet auch die Verlustleistungen von Transformatoren, Kabeln und Hilfsbetrieben (P_V , siehe Formel (4-2)). Diese Verlustleistung kann abgeschätzt werden, weshalb sich eine entsprechende messtechnische Auswertung kaum lohnt. Wichtig wäre es aber, die Leistung des Gebäudes P_G zu wissen. Aus diesem Grund wäre es äusserst empfehlenswert, wenn der Verbrauch des Gebäudes separat gemessen wird und dass das Energiemanagement in Echtzeit auf diesen Messwert Zugriff hat.

5.3 EINSPEISEPUNKT PV-ANLAGE

Während dem Projektverlauf hat sich der Einspeisepunkt der PV-Anlage geändert, was beim Vergleich der *Darstellung 2-1* mit der *Darstellung 4-2* ersichtlich ist. Die PV-Anlage ist nun auf Seite Gebäude (Transformator Gebäude) angeschlossen. Die Energie der PV-Anlage fliesst nun also über den Transformator des Gebäudes auf die Mittelspannungsseite und via Transformator Seilbahn zum Seilbahnantrieb. Nachteil dieser Variante ist, dass die Energie über zwei Transformatoren fliesst, was entsprechende Verluste verursacht. Es ist dabei aber zu beachten, dass, bei der ursprünglich geplanten Lösung auch ein zusätzlicher Transformator notwendig gewesen wäre (siehe *Darstellung 2-1*). Die Verluste bei einem Transformator setzen sich zusammen aus den Leerlaufverlusten (Eisenverluste) und den zusätzlichen Verlusten bei Belastung des Transformators (Kupferverluste). Aufgrund des Wegfalls des separaten Transformators 400 V/690 V für die PV-Anlage entfallen dessen Leerlaufverluste (Eisenverluste). Andererseits gibt es aufgrund des Energieflusses zwischen PV-Anlage und Seilbahnantrieb bei den bestehenden Transformatoren etwas höhere Kupferverluste. In Summe dürften sich diese beiden Verluste in etwa aufheben, was zur Folge hat, dass es aus Sicht Energieverlust wohl keinen Unterschied macht, wo die PV-Anlage angeschlossen ist. Zu bemerken ist auch, dass vermutlich ein beachtlicher Teil der von der PV-Anlage produzierten Energie direkt vom Gebäude verbraucht wird. Um dies besser auszu-

werten, wäre aber, wie im vorangehenden Abschnitt erwähnt, eine entsprechende Messung des Verbrauchs des Gebäudes notwendig. Zu beachten ist, dass ein Energiefluss zwischen PV-Anlage und Seilbahnantrieb über die Mittelspannung nur ökonomisch sinnvoll ist, wenn die Energie dabei nicht durch eine Messstelle des Energieversorgungsunternehmens (EVU) fliesst. Nicht alle Seilbahnbetreiber sind Mittelspannungsbezüger, sondern oft sind die Seilbahnbetriebe Niederspannungsbezüger, was zur Folge hat, dass die Verrechnungsstelle auf der Sekundärseite von einem Transformator angebracht ist. In einem solchen Fall wäre der Ausgleich über die Mittelspannungsseite ökonomisch betrachtet nicht zielführend.

5.4 BREMSENERGIE

Nicht bei jeder Seilbahn fällt im Verhältnis gleich viel Bremsenergie an. Der Anteil an Bremsenergie ist abhängig vom Streckenverlauf der Seilbahn, der Bauweise sowie dem Fahrgastaufkommen. Gibt es markante Steigungsänderungen im Streckenverlauf ist der Anteil an Bremsenergie im Allgemeinen höher, als wenn die Steigung der Strecke ziemlich konstant ist. Bei einer Standseilbahn ohne Gegenseil (siehe Darstellung 3-7) ist der Anteil der Bremsenergie im Allgemeinen höher als bei einer Standseilbahn mit Gegenseil. Der Grund liegt im Gewicht des Seiles. Bei einer Standseilbahn mit Gegenseil ist das Gewicht bergwärts und das Gewicht talwärts mehr ausgeglichen, als bei einer Standseilbahn ohne Gegenseil, was zur Folge hat, dass weniger Bremsenergie anfällt. Einen weiteren Einflussfaktor ist das Fahrgastaufkommen. Ist das Fahrgastaufkommen bergwärts und talwärts ausgeglichen, fällt weniger Bremsenergie an, als wenn es grosse Schwankungen zwischen dem Fahrgastaufkommen berg- und talwärts gibt. Die Standseilbahn Sierre – Montana besitzt ein Gegenseil, weshalb bei der Anlage Sierre – Montana im Verhältnis zu Anlagen ohne Gegenseil weniger Bremsenergie anfällt. Bei der Standseilbahn Sierre – Montana werden rund 12.7 % des Energiebedarfs des Seilbahnmotors, zu einem späteren Zeitpunkt vom Seilbahnmotor wieder als Bremsenergie abgegeben (berechnet aus E_M^+ und E_M^- , Darstellung 4-4).

Die Strecke der Anlage Sierre – Montana verläuft aber bezogen auf Steigung und Kurven (Reibung) nicht so regelmässig, was zu einer unregelmässigen Leistungsaufnahme des Seilbahnmotors und zu merklichen Bremsleistungsspitzen führt (negative Leistung Darstellung 2-3 / Darstellung 2-4). Die während diesen Bremsleistungsspitzen durch den Seilbahnmotor produzierte Energie kann nur im Energiespeichersystem zwischengespeichert werden, wenn das Energiespeichersystem für die entsprechende Leistung ausgelegt ist. Je leistungsfähiger das Energiespeichersystem ist, desto grösser ist im Allgemeinen der Anteil der Bremsenergie, welche im Energiespeichersystem zwischengespeichert werden kann. Darstellung 2-3 zeigt, dass eine Speicherleistung in der Grössenordnung von 400 kW notwendig ist, wenn im ungünstigsten Lastfall talwärts immer noch möglichst die maximale Bremsleistung im Energiespeichersystem aufgenommen werden soll. Das Zwischenspeichern von einem hohen Anteil Bremsenergie ist häufig nur mit einem im Verhältnis zum Seilbahnantrieb sehr leistungsfähigem Energiespeichersystem möglich.

5.5 ENERGIEVERBRAUCH UND EIGENDECKUNGSRATE

Die Analyse in Kapitel 4.2 zeigt (Darstellung 4-3), dass der Energieverbrauch des betrachteten Energiesystems ziemlich konstant ist und unter Berücksichtigung von einem konstanten Allgemeinen Verbrauch P_{AV} von 40 kW im Bereich von 2539 kWh pro Tag liegt. Zu beachten ist, dass dabei der allgemeine Verbrauch 960 kWh ausmacht (24 h x 40 kW). Der Verbrauch des Seilbahnmotors liegt bei rund 1579 kWh pro Tag. Hochgerechnet auf ein Jahr resultiert ein Gesamtverbrauch von 926'735 kWh (2539 kWh x 365 Tage), wovon der Verbrauch des Seilbahnmotors 576335 kWh (1579 kWh x 365 Tage) ausmacht. Aus diesen Zahlen wird ersichtlich, dass rund 62 % der benötigten Energie vom Seilbahnmotor aufgenommen wird. Die restlichen 38 % fallen auf den allgemeinen Verbrauch. Die installierte PV-Anlage besitzt eine Peak-Leistung von 62 kWp, woraus ein Ertrag von etwa 80'000 kWh pro Jahr abgeschätzt werden kann (Annahme ca. 1200 Volllaststunden am Aufstellungsort). Die PV-Anlage deckt also auf ein Jahr bezogen rund 8.6 % der verbrauchten Energie. Zusätzlich zur PV-Anlage kommt noch die Bremsenergie. Zusammen resultiert pro Jahr eine Eigendeckungsrate von rund 16.5 %. Die Resultate der Analyse in Kapitel 4.2 zeigen, dass die Eigendeckungsrate pro Tag stark variiert (11.8 % bis 25.5 %). Diese Schwankungen werden aufgrund der Witterung (Sonneneinstrahlung) verursacht. An Tagen mit viel Sonnenschein ist die von der PV-Anlage produzierte Energiemenge grösser als an Tagen mit wenig Sonnenschein, was sich entsprechend auf die Eigendeckungsrate auswirkt. Betrachtet man nur den Verbrauch des Seilbahnmotors, wird aus Darstellung 4-3 ersichtlich, dass an Tagen mit guter Witterung eine Eigendeckungsrate bezogen auf den Verbrauch des Seilbahnmotors von grösser 40 %

möglich ist, was bedeutet, dass mehr als 40 % der für das Fahren der Seilbahn benötigten Energie lokal produziert wird.

Die vorangehend aufgeführten Prozentwerte können aber nicht ohne weiteres auf andere Seilbahnen angewendet werden. Der Energieverbrauch pro Fahrt, Anzahl Fahrten pro Jahr sowie die Grösse von einer allfälligen PV-Anlage können von Projekt zu Projekt variieren, was sich auch in den von Frey Stans durchgeführten Simulationen von verschiedenen Projekten widerspiegelt. Die Standseilbahn Sierre – Montana hat im Vergleich zu anderen Seilbahnen aufgrund ihrer Streckenlänge und aufgrund ihrem Streckenverlauf (Kurven, Reibung) einen im Verhältnis hohen Energieverbrauch pro Fahrt. Zudem fährt die Anlage unabhängig von der Witterung nach einem vorgegebenen Fahrplan. Die Betriebszeiten der Standseilbahn Sierre – Montana sind im Vergleich mit rein touristischen Bahnen lang, was bedeutet, dass, abgesehen vom Hochsommer, pro Tage mehrere Fahrten bei kompletter Finsternis durchgeführt werden (kein Ertrag der PV-Anlage).

5.6 15-MINUTEN-LEISTUNGSSPITZENWERT

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, war beim Projekt Sierre – Montana das Ziel den 15-Minuten-Leistungsspitzenwert zu reduzieren. In *Darstellung 4-5* ist ersichtlich, dass die 15-Minuten-Leistungsmittelwerte dank PV-Anlage und Energiespeichersystem im Allgemeinen reduziert werden. Zu beachten ist, dass für die Verrechnung der höchste 15-Minuten-Leistungsmittelwert innerhalb der Betrachtungsperiode, der 15-Minuten-Leistungsspitzenwert massgebend ist. Um den Einfluss von PV-Anlage und Energiespeichersystem bezogen auf einen Monat oder sogar bezogen auf ein ganzes Jahr zu bestimmen, müssen ausführlichere Auswertungen durchgeführt werden, als dies im Rahmen von diesem Bericht möglich war. Zu bemerken ist, dass eine solche Analyse erst richtig sinnvoll ist, wenn der Leistungsbedarf des Gebäudes P_G messtechnisch erfasst und aufgezeichnet wird.

5.7 RÄUMUNG DER SEILBAHN

Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, sieht das Räumungskonzept bei Ausfall der Hauptenergieversorgung vor, mit dem Hauptantrieb, gespeist ab dem Energiespeichersystem, in die näher gelegene Endstation zu fahren. Die Rückfahrt in die näher gelegene Endstation entspricht dem generischen ESRE-Konzept, wie es nun auch bei anderen Seilbahnprojekten angewendet werden soll. Entsprechend diesem Räumungskonzept sind die Reserve-Aufnahmekapazität und die Reserve-Abgabekapazität (siehe Kapitel 3.3) bestimmt worden. Bei der Standseilbahn Sierre – Montana sind mehrere Zwischenstationen vorhanden. Der Ersatzräumungsantrieb (siehe Kapitel 3.3) wurde von Seite Seilbahnbauer mechanisch so ausgelegt, dass mit diesem Antrieb nur bis in die nähergelegene Zwischenstation gefahren werden kann. Es ist also nicht vorgesehen, mit dem Ersatzräumungsantrieb eine halbe Fahrt zu machen, sondern nur bis zur nächsten Zwischenstation zu fahren. Diese Auslegung stellt im Vergleich zu anderen Seilbahnen eine Ausnahme dar, wurde aber aufgrund der langen Streckenlänge und der vorhandenen Zwischenstationen bei der Standseilbahn Sierre – Montana so realisiert, um die Auslegung des Ersatzräumungsantrieb zu optimieren. Entsprechend könnte nun auch die Räumung bei Ausfall der Hauptenergieversorgung (Hauptantrieb/Energiespeichersystem) angepasst werden. Die Reserve-Aufnahmekapazität und die Reserve-Abgabekapazität könnten so ausgelegt werden, dass nur eine Fahrt in die nächstgelegene Zwischenstation möglich ist und nicht mehr eine halbe Fahrt in die nächstgelegene Endstation. Dies hätte zur Folge, dass die Reserve-Aufnahmekapazität und die Reserve-Abgabekapazität verkleinert werden könnten und mehr Kapazität für die restlichen Anwendungsziele zur Verfügung steht. Die Simulationsergebnisse (*Darstellung 4-6* und **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) zeigen aber, dass bei der aktuellen Grösse der PV-Anlage (ca. 60 kWp) daraus kein Mehrwert entsteht. Die Eigenverbrauchsrate sowie die Eigendeckungsrate sind bei den Simulationsdurchgängen 31 und 41 gleich, was bedeutet, dass auch durch eine Vergrösserung der nutzbaren Kapazität die Eigendeckungsrate nicht erhöht werden kann. Das bedeutet, dass die aktuell vorhandene nutzbare Kapazität für die Zwischenspeicherung von Energie ausreicht. Erst bei einer allfälligen Vergrösserung der PV-Anlage, würde eine Vergrösserung der nutzbaren Kapazität ein Mehrwert bringen.

5.8 GRÖSSE DER PV-ANLAGE

Darstellung 4-6 zeigt, dass eine Vergrösserung der PV-Anlage auf z.B. 100 kWp eine Steigerung der Eigendeckungsrate um rund 3.5 % (Simulationsdurchgang 31/Simulationsdurchgang 33) zur Folge hat. Wird gleichzeitig noch die Reserve-Aufnahmekapazität und die Reserve-Abgabekapazität beim Energiespeichersystem gemäss vorangehendem Abschnitt optimiert ist eine Steigerung um bis ca. 5 % mög-

lich (Simulationsdurchgang 42). Wird die PV-Anlage noch mehr vergrössert, nimmt der Nutzen bei optimierten Reserven-Kapazitäten fast konstant zu (Simulationsdurchgänge 43, 43,44). Erst ab einer PV-Anlage grösser 200 kWp (Simulationsdurchgang 45) steigt der Nutzen nicht mehr im gleichen Ausmass an, was bedeutet, dass ein Sättigungseffekt eintritt. Ohne Optimierung der Reserven-Kapazitäten findet diese Sättigung schon früher statt (Simulationsdurchgänge 35, 37, 39), was bedeutet, dass eine Vergrösserung der PV-Anlage im Verhältnis nicht mehr den gleichen Nutzen bringt. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** zeigt die simulierte Eigenverbrauchsrate in Abhängigkeit der Grösse der PV-Anlage. Bei gegebenem Energiespeichersystem kann die PV-Anlage noch deutlich vergrössert werden, ohne dass die Eigenverbrauchsrate markant sinkt. Aufgrund des im Vergleich zu anderen Standseilbahnen hohen Energiebedarfs der Standseilbahn Sierre – Montana ist empfohlen, die PV-Anlage, sofern möglich, noch deutlich zu vergrössern.

5.9 DIMENSIONIERUNG ENERGIESPEICHERSYSTEM / PROJEKTUMSETZUNG

Das Energiespeichersystem für eine Seilbahn mit Pendelbetrieb sollte so dimensioniert werden, dass es möglichst gut abgestimmt ist auf den Verbrauch der Seilbahn, auf weitere Verbraucher an der gleichen Verrechnungsstelle und auf die PV-Anlage. Die finale Dimensionierung sollte somit erst durchgeführt werden, wenn die anderen Einflussgrössen bekannt sind. Nur so kann eine ökonomisch optimale Auslegung des Energiespeichersystems erfolgen. Ohne Simulationsmöglichkeit ist es sehr schwierig, den Nutzen eines Energiespeichersystems bei einer konkreten Ausgangslage im Vorfeld zu bestimmen. Mit dem Simulationstool ESFORsim können unterschiedliche Varianten simuliert und miteinander verglichen werden. Mit ESFORsim ist es somit möglich, während der Planungsphase die optimale Grösse einer PV-Anlage und eines Energiespeichersystems für eine bestimmte Seilbahn zu bestimmen.

Der zeitliche Leistungsverlauf über eine Fahrt, der Energiebedarf pro Fahrt, Anzahl Fahrten pro Tag, Anzahl Betriebstage pro Jahr und das Fahrgastaufkommen können bei verschiedenen Seilbahnen sehr unterschiedlich sein. Somit ist es nicht möglich, die Erkenntnisse von einer Seilbahn zu generalisieren und direkt auf andere Seilbahnen anzuwenden. Es muss immer eine Einzelbetrachtung der konkreten Seilbahn durchgeführt werden. Das geeignetste Hilfsmittel für eine solche Betrachtung sind Simulationen.

Aufgrund der Integration eines Energiespeichersystems in die elektrischen Einrichtungen der Seilbahn ergeben sich neue Projektschnittstellen. Um eine optimale Lösung zu realisieren ist eine gute Absprache und Koordination zwischen dem Seilbahnbetreiber, dem Lieferanten einer lokalen Energieerzeugungsanlage (PV-Anlage), dem lokalen Elektroinstallateur, dem Seilbahnbauer, dem Lieferanten des Energiespeichersystems und je nach Situation auch mit dem Stromnetzbetreiber notwendig.

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Bei der Standseilbahn Sierre – Montana wurde zum ersten Mal das Energiespeichersystem ESFOR eingesetzt. Das Energiespeichersystem ESFOR wurde von Frey Stans entwickelt für den Einsatz bei Seilbahnen mit Pendelbetrieb. ESFOR ist bei der Standseilbahn Sierre – Montana seit Ende 2022 erfolgreich in Betrieb. Später wurde noch eine PV-Anlage (Photovoltaikanlage) mit einer Leistung von 62 kWp in Betrieb genommen, welche auf dem Dach der Bergstation installiert ist. Der Seilbahnbetreiber ist Mittelspannungsbezüger und ab der gleichen Mittelspannungseinspeisung ist neben der Seilbahn noch das Stationsgebäude gespeist. Das Energiespeichersystem dient zum Zwischenspeichern von Energie und zur Sicherstellung der Räumung bei Ausfall der Hauptenergieversorgung.

Die Auswertungen zeigen, dass an einem Tag mit guter Witterung im Sommer, unter der Annahme von einem bestimmten zur Seilbahn zusätzlichen Verbrauch, bis 25.5 % des gesamten Energiebedarfs (Seilbahn/Station) lokal durch die PV-Anlage und die Seilbahn (Bremsen) produziert wird und dank dem Energiespeichersystem auch lokal wiederverwendet werden kann. Die Eigenverbrauchsrate liegt, dank dem Energiespeichersystem, bei 100 %. Bezogen nur auf den Seilbahnmotor wird an einem solchen Tag rund 41 % der für das Fortbewegen der Seilbahn benötigten Energie direkt vor Ort produziert und verbraucht.

Die Seilbahn Sierre – Montana besitzt keinen klassischen Notantrieb mehr. Die Funktionalität des Notantriebs ist aufgeteilt auf den Hauptantrieb mit Energiespeichersystem und auf den sogenannten Ersatzräumungsantrieb. Bei Ausfall der Hauptenergieversorgung wird die Räumung mit dem Hauptantrieb, gespeist ab dem Energiespeichersystem ESFOR, sichergestellt. Bei Ausfall einer Komponente im Hauptantriebsstrang wird die Räumung mit dem Ersatzräumungsantrieb, gespeist direkt ab dem Strom-

netz, sichergestellt. Der Dieselmotor des klassischen Notantriebs entfällt. Damit entfallen auch die Kosten für die Beschaffung des Dieselmotors, der Platzbedarf, die Aufwände für die Lüftung des Aufstellungsortes und der Wartungsaufwand.

Aktuell wird der Leistungsbedarf des Stationsgebäudes nicht separat messtechnisch erfasst. Es wird empfohlen, diesen Verbrauch separat zu messen und den Messwert dem in die Seilbahnsteuerung integrierten Energiemanagementsystem zur Verfügung zu stellen.

Da der Energieverbrauch der Standseilbahn Sierre – Montana im Vergleich zu anderen Standseilbahnen eher hoch ist, wird empfohlen die PV-Anlage, sofern möglich, noch deutlich zu vergrössern. Evtl. könnte auf der Südseite der Station auch die Fassade mit PV-Modulen bestückt werden. Eine solche Lösung würde vor allem auch im Winter den PV-Ertrag markant steigern.

Aktuell wird ab dem Energiespeichersystem eine Räumungsfahrt zurück in die näheregelegene Endstation sichergestellt. Analog zum Räumungsszenario mit Ersatzräumungsantrieb könnte auch das Räumungsszenario bei Ausfall der Hauptenergieversorgung so angepasst werden, dass nur eine Fahrt zur nächsten Zwischenstation sichergestellt wird. Die Reserve-Kapazitäten (siehe Kapitel 3.3) könnten so verringert werden, was zur Folge hat, dass mehr Kapazität zum Zwischenspeichern von Energie zur Verfügung steht. Diese zusätzliche Kapazität zum Zwischenspeichern bringt aber nur einen grösseren Nutzen, wenn die PV-Anlage deutlich vergrössert wird.

Die optimale Auslegung von einem Energiespeichersystem für eine Seilbahn mit Pendelbetrieb muss anlagenspezifisch und am besten durch Simulieren von verschiedenen Varianten ermittelt werden. Dabei müssen alle relevanten Einflussgrössen wie andere Verbraucher an der gleichen Messstelle, Grösse einer allfällig vorhandenen PV-Anlage, allfällige Einschränkungen von Seite Stromnetz, Fahrgastaufkommen, Fahrplan, etc. bekannt sein oder möglichst genau abgeschätzt werden. Nur unter Berücksichtigung dieser Einflussgrössen, kann ein Speichersystem optimal ausgelegt werden. Da Seilbahnen und deren Betrieb voneinander sehr stark abweichen können, ist es nicht möglich, analysierte Wert von einer Seilbahn ohne weiteres auf eine andere Seilbahn zu übertragen.

Die Integration von einem Energiespeichersystem in eine Seilbahn hat zusätzliche Projektschnittstellen zwischen Lieferant Energiespeichersystem, Lieferant PV-Anlage, Seilbahnbetreiber, Seilbahnbauer, lokalem Elektroinstallateur und allenfalls dem lokalen Stromnetzbetreiber zur Folge. Dies Schnittstellen sind beim Projektmanagement entsprechend zu beachten.

7. Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

ABB	Asea Brown Boveri
AC	Alternative Current / Wechselstrom
BAV	Bundesamt für Verkehr
DC	Direct Current / Gleichstrom
EEA	Energieerzeugungsanlage
EMS	Energiemanagementsystem
ERA	Ersatzräumungsantrieb
ESFOR	Energy Storage System For Ropeways
ESFORsim	Energy Storage System For Ropeways Simulationstool
ESRE	Energy Storage Supplied Recovery.
ESS	Energiespeichersystem
EVU	Energieversorgungsunternehmen
HAER	Hauptantrieb mit integriertem Energiespeichersystem
HEV	Hauptenergieversorgung
HEV	Hauptenergieversorgung
HSLU	Hochschule Luzern
LTO	Lithium-Titanat-Oxid
NMC	Nickel-Mangan-Cobalt
NS-HV	Niederspannungs-Hauptverteilung
PV	Photovoltaik
SMC	Compagnie de chemin de fer et d'autobus Sierre – Montana – Crans SA

8. Technische Daten der Standseilbahn

Standseilbahn Sierre/Siders –Crans-Montana gare, Linie 2225 (Regionalverkehr)

Standseilbahn im Pendelbetrieb mit 2 Wagen und Gegenseil

Nutzgleislänge	4'191 m
Höhenunterschied	927 m
Maximale Steigung	40,8 %
Durchschnittliche Steigung	22,8 %
Spurweite	1,4 m
Anzahl Brücken/Viadukte	4
Längste Brücke/längstes Viadukt	342
Anzahl Tunnel	2
Gesamtlänge der Tunnel	151 m
Längster Tunnel	78 m
Höhe der Talstation und der Umkehr- und Spannungsstation	537 m
Höhe der Bergstation, des Seilbahnantriebs	1'470 m
Zugseil, Typ Performa	44 mm
Gegenseil, Typ Performa	25 mm
Kapazität pro Wagen	120 + 1 Pers.
Gewicht eines Wagens, Nutzlast	16'400 kg, 9'600 kg
Maximale Geschwindigkeit	8,0 m/s
Stündliche Kapazität pro Richtung	360 Pers./Std.
Asynchronmotor und IGBT-Frequenzumrichter	
Motorenleistung	1'000 kW
Energierückgewinnungs- und Energiespeichersystem ESFOR	
Photovoltaikanlage auf dem Dach des Bahnhofs Crans-Montana.	62 kWp
Hersteller des mechanischen Teils	Garaventa AG, Goldau
Hersteller des elektrischen Teils	Frey AG, Stans
Hersteller der Wagen	CWA, Olten
Eröffnung der Standseilbahn	01.10.1911
Umbau der Standseilbahn	16.12.1997
Neubau der Standseilbahn	11.12.2022