



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-126

Energiemanagement Bergbahnen mit Zwischenspeicher für PV und Rekuperation

Standseilbahn “Biel / Bienne – Magglingen / Macolin”

Schlussbericht

Autorin/Autor:

Olivier Duvanel

olivier.duvanel@hslu.ch

Institution:

Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur

FH Zentralschweiz

Adresse, Mail, Homepage :

HSLU Technik & Architektur

Technikumstrasse 21

CH-6048 Horw

<https://www.hslu.ch/de-ch/technik-architektur/>

Ort und Datum

Horw, den 15. Februar 2022

Begleitgruppe

Tristan Chevroulet, BAV-Programm "ESöV 2050"

Daniel Schaller, Planair SA

Jean-Loup Robineau, Planair SA

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

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

CH-3003 Bern

Programmleiter

Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: P-126

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 15.02.2022

Inhalt

Inhalt.....	1
2 Executive Summary in Deutsch.....	4
3 Executive Summary in einer zweiten Landessprache.....	5
4 Executive Summary in Englisch.....	6
5 Zusammenfassung in Deutsch.....	7
6 Zusammenfassung in einer zweiten Landessprache.....	13
1. Ausgangslage.....	20
1-1 Allgemeiner Kontext.....	20
1-2 Projektkontext.....	21
1-3 Seilbahnen.....	21
1-4 Betriebliche Aspekte.....	24
1-5 Energieaspekte.....	24
2. Ziele der Arbeit.....	25
2-1 Einleitung.....	25
2-2 "Rekuperierte" Bremsenergie speichern.....	25
2-3 PV-Energie nutzen.....	25
2-4 Notantrieb bzw. Notbetrieb.....	26
2-5 Technologiewahl des Speichers.....	26
2-6 Bewirtschaftung des Speichers.....	26
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand.....	27
3-1 Vorgehen.....	27
3-2 Stand der Technik 2018.....	27
3-3 Speicherung der Energie.....	29
3-4 Energiewandlung.....	33
3-5 PV-Anlage.....	35
3-6 Energiemanagement.....	36
4. Ergebnisse.....	38
4-1 Projektplanung.....	38
4-2 Energieschätzung von 2017.....	39
4-3 Hilfsbetriebe und Fahrzeugladung.....	40
4-4 "Rekuperierte" Bremsenergie.....	41
4-5 PV-Anlage.....	45
4-6 Notantrieb.....	49
4-7 Wirtschaftlichkeit.....	49

5.	Diskussion.....	51
5-1	“Rekuperierte“ energie	51
5-2	PV-Anlage	51
5-3	Notantrieb.....	52
5-4	Wirtschaftlichkeit	52
6.	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	53
7.	Veröffentlichungen und Ausblick	55
8.	Danksagung.....	56
9.	Verzeichnisse.....	57
8-1	Abkürzungsverzeichnis	57
8-2	Abbildungsverzeichnis	58
8-3	Tabellenverzeichnis	59
10.	Literaturverzeichnis	60
Anhang		61
1	Modellierung einer Pendelbahn	61
1.1	Einleitung.....	61
2	Kräfte	61
2.1	Kräfte am Wagen	61
2.1.1	<i>Steigung und Gefälle (Hangabtriebskraft)</i>	61
2.1.2	<i>Rollreibung Wagen</i>	62
2.1.3	<i>Luftwiderstand</i>	64
2.2	Kräfte am Zug- bzw. Gegenseil.....	64
2.2.1	<i>Fall “Aufzug”</i>	65
2.2.2	<i>Fall “Schrägaufzug”</i>	66
2.2.3	<i>Rollreibung Seil</i>	67
2.3	Zusammenstellung der Kräfte	69
2.3.1	<i>Fall “Ohne Gegenseil”</i>	69
2.3.2	<i>Fall “Mit Gegenseil”</i>	71
2.4	Zwischenfazit und Vereinfachungen	75
3	Energie.....	75
3.1	Energie der Wagen	75
3.1.1	<i>Steigung und Gefälle</i>	75
3.1.2	<i>Rollreibung Wagen</i>	76
3.1.3	<i>Luftwiderstand</i>	77
3.2	Energie am Zug- bzw. Gegenseil.....	79
3.2.1	<i>Fall “Schrägaufzug”</i>	79
3.2.2	<i>Rollreibung Seil</i>	81
3.3	Zusammenstellung der Energien	82
3.3.1	<i>Fall “Ohne Gegenseil”</i>	82
3.3.2	<i>Fall “Mit Gegenseil”</i>	85
3.4	Erkenntnisse und Zwischenfazit.....	88

4	Trägheitsmomente und Energie	89
4.1	Einleitung.....	89
4.2	Translation.....	89
4.2.1	Wagen	89
4.2.2	Zugseil.....	89
4.3	Rotation	90
4.3.1	Antriebsräder.....	90
4.3.2	Motor / Getriebe	90
4.3.3	Bremsscheibe.....	91
4.4	Zusammenstellung der Trägheitsmomente	91
4.5	Erkenntnisse und Zwischenfazit.....	91
5	Leistung und Wirkungsgrad	92
5.1	Leistung	92
5.2	Wirkungsgrad	92
5.3	Einfluss auf die Energie	93
6	Einflussfaktoren	93
6.1	Auflistung.....	93
6.2	Verfeinertes Modell	94
6.2.1	Streckenprofil.....	94
6.2.2	Simulation anhand neues Streckenprofils.....	95
6.2.3	Vergleich mit den Messungen.....	96
6.2.4	Vergleich mit dem vereinfachten Modell	98
7	Auslegung des Speichersystems.....	99
7.1	Eckdaten	99
7.2	Anforderung des Speichers: Energieteil	99
7.3	Anforderung des Speichers: Leistungsteil	100
7.4	Wahl des Speichers	100
8	Anhang.....	101
8.1	Anlage	101
8.1.1	Eckdaten	101
8.1.2	Strecke	101
8.1.3	Zugseil.....	101
8.1.4	Wagen	101
8.1.5	Hauptantrieb	102
8.1.6	Speichersystem ab Sommer 2019	102

1 Executive Summary in Deutsch

Seilbahnen gibt es nicht nur zu den Berg- und Tourismusgebieten, sondern sie sind auch Bestandteil des öffentlichen Verkehrs.

Das vorliegende Projekt beschäftigt sich mit der Standseilbahn "Biel-Magglingen", welche vollständig in das Angebot des öffentlichen Verkehrs von Biel-Bienne (VB/TPB) integriert ist. Einerseits wollen die Betreiber den Anteil der selbsterzeugten erneuerbaren Energie erhöhen. Andererseits machen die Energiekosten der Seilbahnanlage ca. 50% der Betriebskosten¹ (→ Energie- und Unterhaltskosten) aus. Somit ist dort ein grosser Hebel, um die Kosten zu reduzieren.

Um dies zu ermöglichen, wurden im Juli 2017 Messungen vor Ort in Magglingen durchgeführt. Nach der Analyse der Messdaten konnte eine Machbarkeitsstudie erstellt werden. Diese zeigt, dass mit einem Speicher, welcher in der Seilbahnsteuerung integriert ist, die Bremsenergie sowie die erneuerbar erzeugte Energie von einer geplanten PV-Anlage gut bewirtschaftet werden kann: Das Potenzial liegt für die Anlage bei einem Eigenverbrauchsgrad von bis zu 80-90%. Auch die Kosten für den Energiebezug können um ca. 30% gesenkt werden.

Mit der Unterstützung des BAV-Programms "ESöV 2050" konnte ein Pilotprojekt finanziert werden. Die Umsetzung wurde zusammen mit der Firma Frey AG Stans und der Doppelmayr - Garaventa Group unter der Leitung der Hochschule Luzern T&A realisiert.

Die Standseilbahn (Hauptmotor 315 kW) wurde im Sommer 2019 saniert und mit einem Speichersystem (67 kWh / 60 kW) ausgerüstet. Im September 2020 wurde die PV-Anlage (42 kWp) in die Bahnsteuerung integriert. Die ersten Erkenntnisse aus dieser Weltpremiere sind hier aufgelistet:

- Die "rekuperierte" **Bremsenergie vom Antrieb** kann bis zu **ca. 80% wiederverwendet** werden.
- Die **erneuerbare Energie der PV-Anlage** kann bis zu **ca. 80% im Eigenverbrauch** genutzt werden.
- Das Speichersystem wird später (Frühling 2022) als Energiequelle für den Notantrieb eingesetzt werden können.
- **Dank** des Speichersystems und der **entwickelten Energiemanagementsteuerung** können die **Kosten für den Bezug von elektrischer Energie um ca. 30% reduziert** werden.

¹ In der Seilbahnbranche gehören die Amortisations- sowie die Personalkosten nicht zu den Betriebskosten.

2 Executive Summary in einer zweiten Landessprache

Les remontées mécaniques déjà présentes dans les régions de montagne et dans les zones touristiques peuvent également faire partie des transports publics.

Le présent projet concerne le funiculaire de “Bienne/Biel – Macolin/Magglingen”, qui est totalement intégré dans l’offre des transports publics biennois (→ VB / TPB). D’une part, les opérateurs qui souhaiteraient augmenter la part d’énergie renouvelable autoproduite et, d’autre part diminuer les coûts énergétiques d’un système de transport à câble. En effet, ces derniers représentent environ 50% des coûts d’exploitation² (→ coûts de l’énergie et les frais de maintenance). Une production locale d’énergie renouvelable est alors une incitation non négligeable pour réduire les charges d’exploitation.

Pour ce faire, des mesures ont été réalisées sur site à Macolin en juillet 2017. Après une analyse de ces dernières, une étude de faisabilité a été réalisée. Celle-ci a démontré qu’avec un dispositif de stockage intégré dans la commande du funiculaire, l’énergie de freinage ainsi que l’énergie renouvelable générée par des panneaux solaires photovoltaïques pourraient être bien utilisées : le potentiel de ce système est un niveau d’autoconsommation allant jusqu’à 80-90%. Les coûts d’approvisionnement en énergie électrique peuvent être également réduits jusqu’à 30%.

Grâce au soutien du programme de l’OFT “STEP 2050” (→ Stratégie énergétique 2050 des transports publics), un projet-pilote a été financé. La mise en œuvre a été réalisée en collaboration avec la société Frey AG de Stans et le groupe Doppelmayr - Garaventa sous la direction de l’université des sciences appliquées “technique & architecture” de Lucerne (→ HSLU T&A).

Le funiculaire (moteur principal de 315 kW) a été entièrement rénové durant l’été 2019 et équipé d’un système de stockage (67 kWh / 60 kW). En septembre 2020, le système photovoltaïque (42 kW-crête) a été intégré dans la commande du funiculaire. Les premiers résultats de cette première mondiale sont énumérés ci-dessous :

- **L’énergie de freinage régénérée** du variateur peut être **réutilisée localement jusqu’à environ 80%**.
- **L’énergie renouvelable de l’installation photovoltaïque** peut être **utilisée jusqu’à environ 80% pour l’autoconsommation**.
- Le système de stockage pourra être utilisé plus tard (→ printemps 2022) comme source d’énergie pour l’entraînement de secours.
- Grâce au système de stockage et au **contrôle de gestion de l’énergie développé**, **les coûts de l’énergie électrique** peuvent être **réduits d’environ 30%**.

² Dans la branche des remontées mécaniques, les frais de personnel et l’amortissement de l’installation ne font pas partie des coûts d’exploitation.

3 Executive Summary in English

This project concerns the funicular “Biel / Bienne – Magglingen/Macolin”, which is fully integrated into the public transport offer of Biel/Bienne (→ VB / TPB).

Cable trams are not only part of mountain regions and tourist areas, but also part of public transport. Operators would like to increase the share of self-generated renewable energy. In addition, they want to reduce the energy expense of a cable transport system, which represents around 50% of the total operating cost³ (→ costs for energy and maintenance), providing a significant incentive.

To investigate the feasibility of achieving these goals, measurements were carried out on-site at Macolin in July 2017. After analysis of the measurement data, a feasibility study was written. The study demonstrated that with a storage system integrated into the funicular control, the braking energy and the renewable energy generated by solar-PV could increase the self-consumption up to 80-90% and reduce electrical energy cost by up to 30%.

A pilot project was financed with the support of the FOT program "ESPT 2050" (Energy strategy 2050 for public transport). The project was carried out in collaboration with the company Frey AG from Stans and the Doppelmayr - Garaventa group under the direction of the University of Applied Sciences “Technical & Architecture” Lucerne (HSLU T&A). The funicular (315 kW main motor) was completely renovated in summer 2019 and equipped with a storage system (67 kWh / 60 kW). In September 2020, the photovoltaic system (42 kWp) was integrated into the funicular control. The first results of this world-first are listed below:

- Up to approx. **80% of the regenerated braking energy of the drive can be reused.**
- Up to about **80% of the renewable energy of the photovoltaic installation can be used** for self-consumption.
- The storage system can be used later (spring 2022) as an energy source for an emergency drive.
- The **costs of electrical energy** can be **reduced by about 30%** due to **the developed energy storage and energy management control system.**

³ For cable cars, amortisation and personnel costs are not considered operational costs.

4 Zusammenfassung in Deutsch

Motivation und Machbarkeitsstudie in 2017

Gemäss Seilbahnbetreibern [1] und Seilbahnlieferanten (Doppelmayr / Garaventa) liegen die Energiekosten bei der Hälfte der Betriebskosten⁴. Ein grosser Anteil davon machen die Abrechnung der Monatsleistung oder die sogenannte Spitzenleistung aus.

Da die Vergütung für die Rückspeisung von elektrischer Energie tief liegt, macht es heutzutage Sinn die Bremsenergie (Rekuperation) des Antriebs sowie die eigene von einer PV-Anlage erzeugte Energie selbst zu verbrauchen.

☞ Um dies zu ermöglichen, muss die Energie in einem lokalen Speicher zwischengespeichert werden.

Bei Pendelbahnen wechselt die Drehrichtung des Antriebsrades bei jedem Zyklus. Zwischen jedem Zyklus steht die Anlage still, da die Fahrgäste aus- bzw. einsteigen müssen. In diesen Fall pendelt das Zugseil je nach Fahrzyklus. Im Gegensatz zu den Umlaufbahnen schwankt die Antriebsleistung massiv.

Quelle [2], Seite 10

Unterscheidung nach der Betriebsweise

Pendelbetrieb

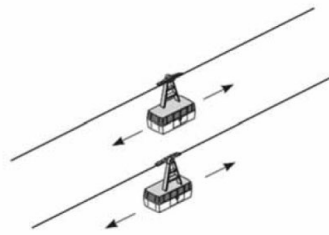


Abbildung 1: Pendelbetrieb

Je nach Streckenprofil oder Lastfall [1] kann die Antriebsleistung sogar negativ sein. Der Antrieb speist ins Netz zurück. Aufgrund dieser stark fluktuierenden Antriebsleistung sind Pendelbahnen für diesen Projektkontext besonders interessant. Im Juli 2017 wurden ca. 900 Messfahrten auf der Anlage "Biel-Magglingen" durchgeführt. Siehe Quelle [3], Seite 19.

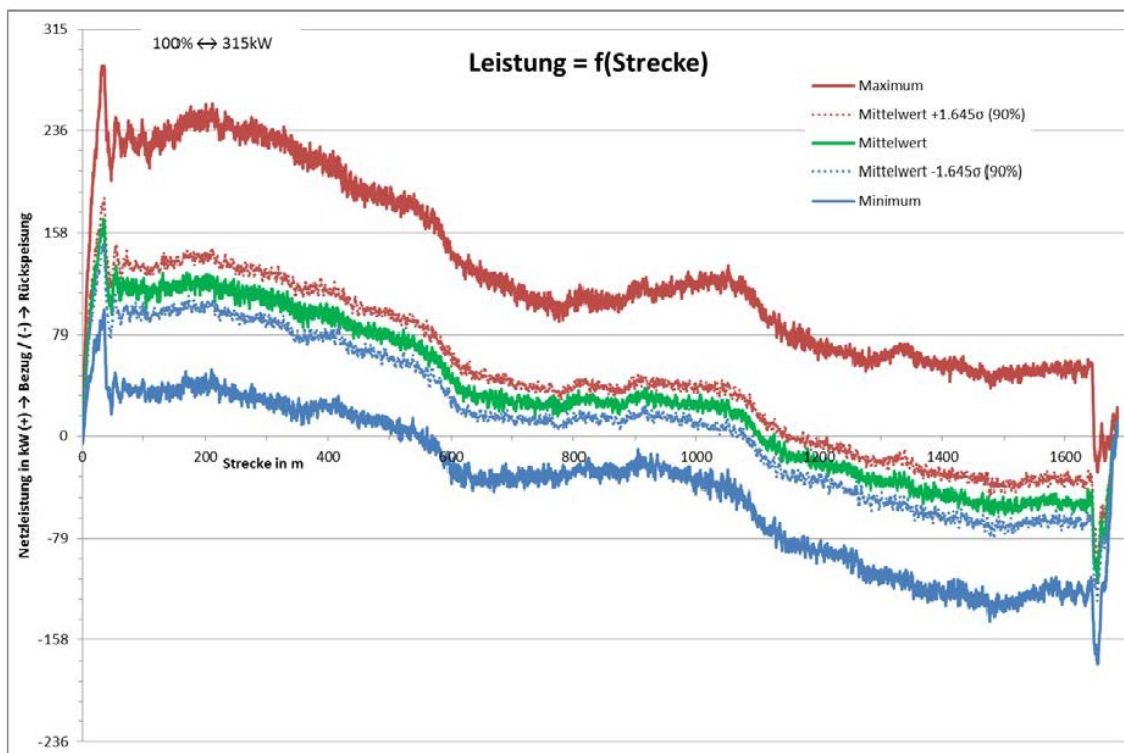


Abbildung 2: Leistungsmessung vom Juli 2017

☞ Am Antrieb liegt der durchschnittliche Rekuperationsgrad der Energie bei 32%.

⁴ In der Seilbahnbranche gehören die Amortisations- sowie die Personalkosten nicht zu den Betriebskosten.

Gemäss den harmonisierten europäischen Seilbahnnormen müssen die Pendelbahnen sowie auch die Umlaufbahnen ein Bergungskonzept vorlegen. Dieses Konzept verlangt das Beistellen eines unabhängigen Antriebes, welcher als "Notantrieb" bezeichnet wird. Im Falle eines Stromausfalles oder bei einer Störung am Hauptantrieb kommt der Notantrieb zum Einsatz. Meistens ist die Energiequelle des Notantriebs Dieseltreibstoff.

☞ Der im Projekt vorgesehene Speicher kann als Energiequelle für den Notantrieb dienen.

Innovation

In diesem Projekt liegt die Innovation beim Einsatz eines Speichers, welcher mehrere Funktionalitäten gewährleisten kann:

- Bremsenergie rekuperieren und für die nächste Fahrt wiedereinsetzen
- Leistungsspitze des Antriebes beim Beschleunigen brechen
- Energie einer EEA (PV, Windkraft) oder einer Wärme-Kraft-Kopplung beim Anhalten der Bahn zwischenspeichern, um sie bei der nächsten Fahrt zu verwenden.
- Im Falle eines Stromausfalles kann der Speicher zusätzlich auch als Notantrieb benutzt werden
- Die volle Integration des Energiemanagementsystems des Speichers in die Bahnsteuerung (→ Lastabhängig)

Dank der Mehrfachnutzung des Speichers kann der Energiebezug der Bergbahn stark reduziert werden und somit können die Stromrechnung sowie die Betriebskosten der Bergbahngesellschaften gesenkt werden. Zudem kann der Anteil der selbst erzeugten (erneuerbaren) Energie in der Energiebilanz gesteigert werden.

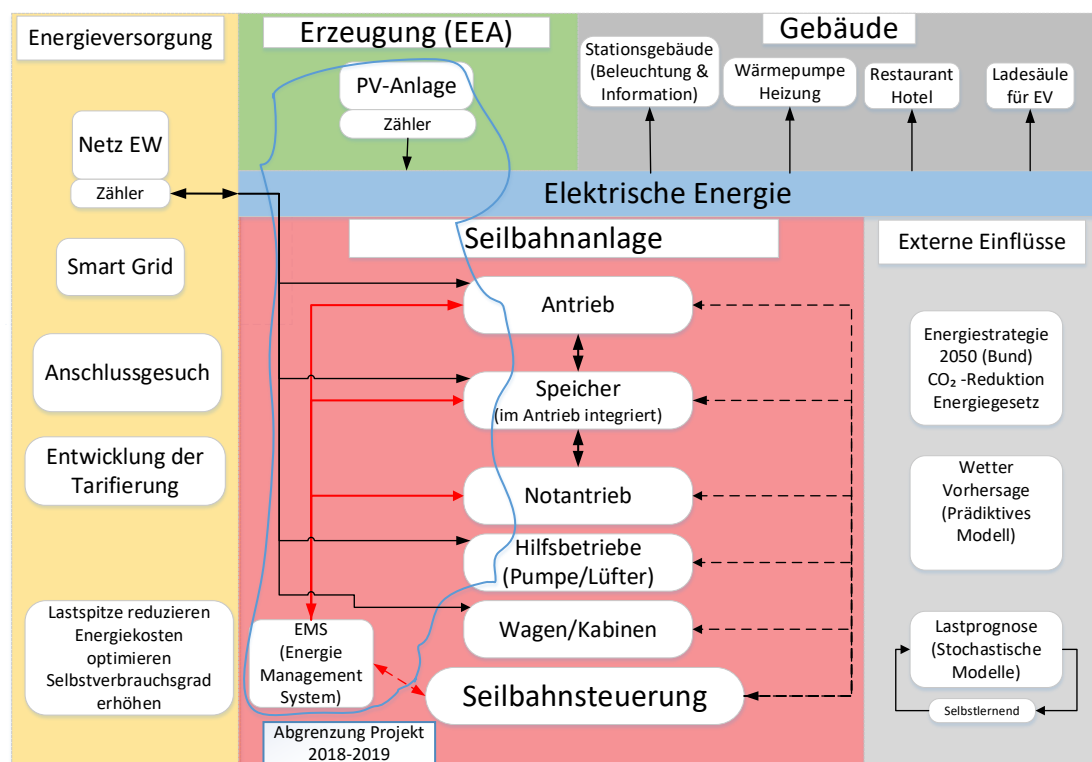


Abbildung 3: Allgemeines Konzept

☞ Eine solche Kombination der erwähnten Lösungen existiert für die Verwendung bei Bergbahnen noch nicht. Das Konzept ist obenstehend dargestellt.

Konzept und Umsetzung

Zwischen dem öffentlichen Netz, dem Speichersystem und der PV-Anlage braucht es ein Ankopplungskonzept, welches hier veranschaulicht wird.

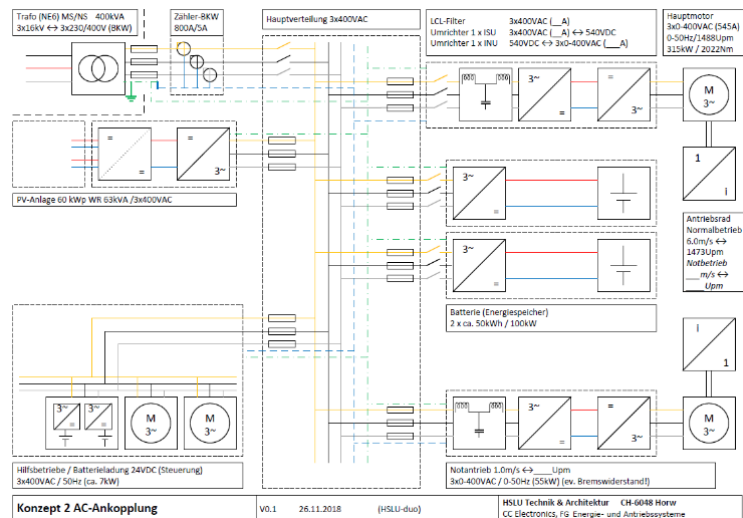
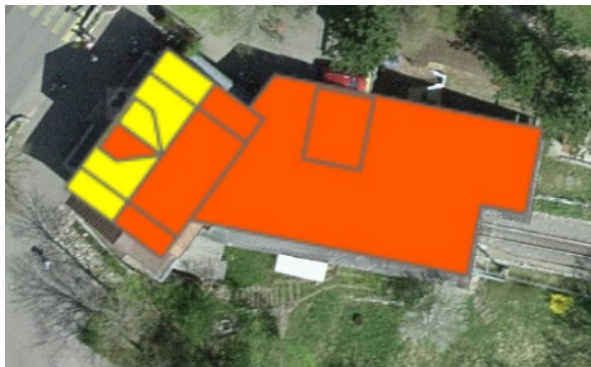


Abbildung 4: AC-Ankopplung

- (+) Standardkomponenten für die Umsetzung.
- (+) Flexibel, beliebig skalierbar (z.B. Speichergrossen), "Retrofit" der bestehenden Anlagen.
- (-) 3 Umwandlungen vom Batteriespeicher bis zum Motor. Reduzierter Eigenverbrauch.

☞ Dieses AC-Konzept konnte schon im Jahr 2019 umgesetzt werden und wurde deshalb für die Pilotanlage "Biel-Magglingen" ausgewählt.

Nachfolgend werden die theoretischen Werte von der Webseite "Sonnendach.ch" mit der umgesetzten Version vom September 2020 für die Standseilbahn "Biel-Magglingen" abgebildet.



Quelle: Sonnendach.ch

Dachfläche: 297 m², Eignung: "Sehr gut"
 Ausrichtung: 101°, Neigung: 17°
 Ertragspotential bei 75%: 36'750 kWh / Jahr
 Spitzenleistung: 41 kWp

Abbildung 5: PV-Anlage in Magglingen



Quelle: Helion und vbb/tpb

Ertragspotential: 40'360 kWh / Jahr
 Spitzenleistung: 42 kWp

☞ Damit eine gute Bewirtschaftung der PV-Anlage erreicht werden kann, muss der Eigenverbrauch des erzeugten Stromes so hoch wie möglich sein. Dieser Umstand macht den Einsatz von Photovoltaik für eine Seilbahnanlage besonders interessant, da diese an allen Wochentagen in Betrieb ist.

Ergebnisse

Nur mit dem Speichersystem

Seit dem 31. August 2019 fährt die sanierte Bahn “Biel-Magglingen” und die Energieflüsse werden gemessen. In der Grafik werden die Energie für die Hilfsbetriebe (Steuerung der Bahn, Hydrauliköl-pumpe, Lüfter des Hauptmotors) sowie die Energie für die Fahrzeugladung (Bordbatterie für die Beleuchtung, Lüfter und Steuerung der Wagen und Heizung der Wagen im Winter) graphisch veranschaulicht.

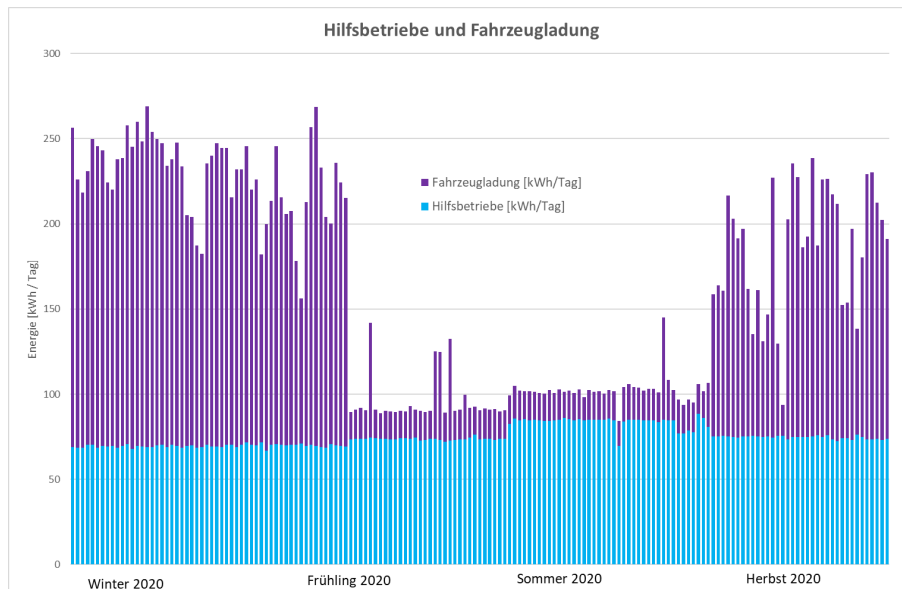


Abbildung 6: Tagesenergie: Hilfsbetriebe und Fahrzeugladung

Im Verlauf des Jahres 2020 lag die tägliche Energie für die Hilfsbetriebe bei ca. 75 kWh. Im Sommer erhöhte sich dieser Wert (→ ca. +10 kWh / Tag), da der Lüfter des Hauptmotors mehr laufen musste.

Der Winter 2020 war nicht besonders kalt, aber die tägliche Heizenergie betrug trotzdem 200 kWh. In der Zwischenzeit wurden der Thermostat und die Heizkörper besser eingestellt. Im Sommer lag die Energie für die Fahrzeugladung im Bereich von ca. 15 kWh /Tag. Dies erklärt den Unterschied in den Stromkosten vom Q1/Q4 zum Q2/Q3.

Ebenfalls werden die tägliche motorische Antriebsenergie sowie die generatorische Antriebsenergie dargestellt. Zudem wird die rückgelieferte Energie und der Eigenverbrauchsgrad der “rekuperierten” Bremsenergie graphisch dargestellt.

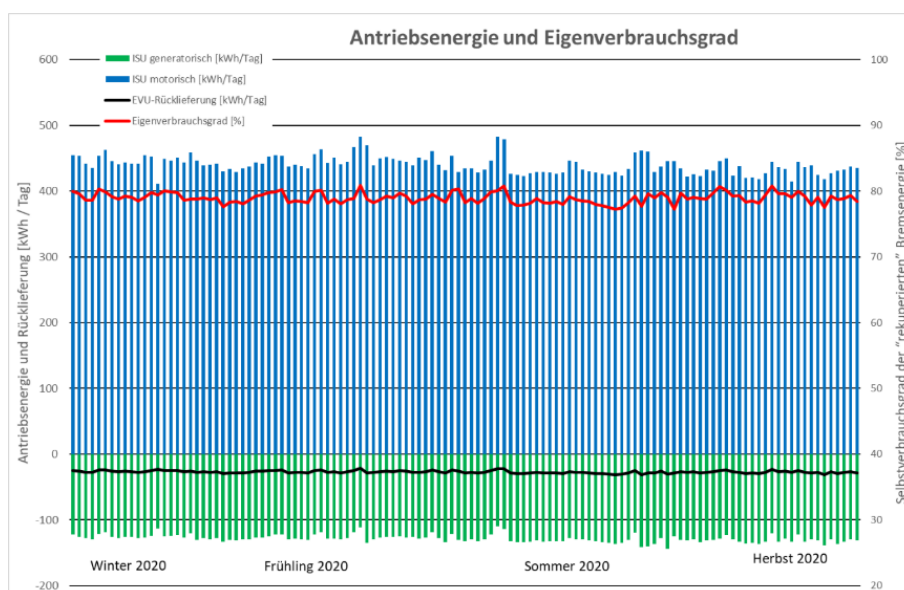


Abbildung 7: Tagesenergie: Antriebsenergie und Eigenverbrauchsgrad

Jeden Tag verbraucht der Antrieb ca. 440 kWh (→ blaue Säule) und speist ca. 128 kWh zurück (→ grüne Säule). Der durchschnittliche Rekuperationsgrad liegt bei 29%. Dank des Speichersystems wird nur ca. 27 kWh ins Netz (→ schwarze Linie) rückgespeist. Dies ergibt einen durchschnittlichen Eigenverbrauchsgrad von 79% (→ rote Linie mit Y-Achse rechts). Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass der Bahnbetreiber die Bezugsenergie um ca. 101 kWh pro Tag reduzieren kann.

☞ Der Eigenverbrauchsgrad liegt bei 79%. Dies bedeutet auch, dass nur 21% der Bremsenergie ins Netz rückgespeist werden muss. Im Jahr 2017 lag der Anteil der rückgelieferten Bremsenergie noch bei 82%.

Kombination PV-Anlage mit dem Speichersystem

Seit dem 18. September 2020 ist die PV-Anlage in der Seilbahnsteuerung integriert. Dies bedeutet, dass die erzeugte erneuerbare Energie direkt im Antrieb und für die Fahrzeugladung bzw. die Hilfsbetriebe verbraucht werden kann.

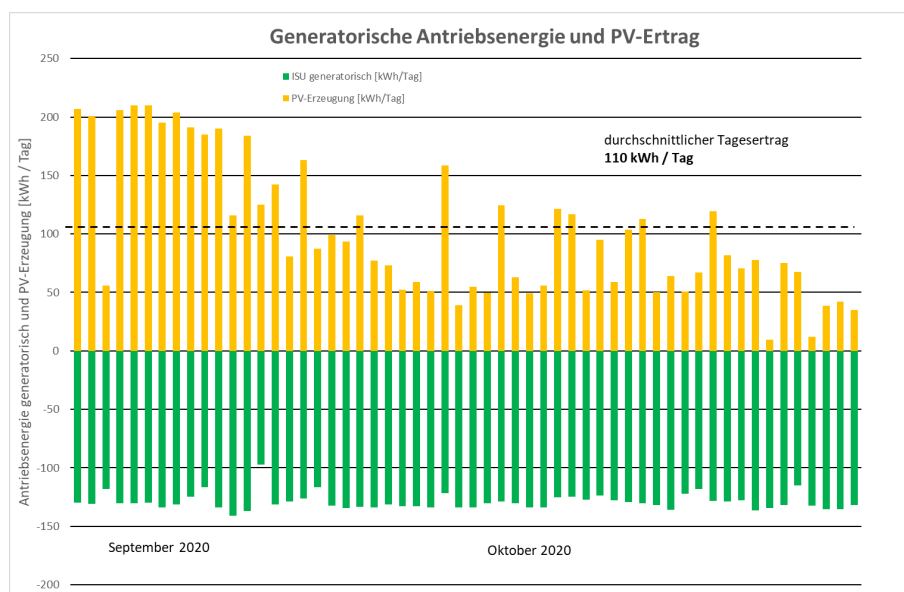


Abbildung 8: Tagesenergie: Antriebsenergie und PV-Ertrag

Gemäss dem Lieferanten der PV-Anlage liegt der potenzielle Jahresertrag bei 40'360 kWh / Jahr. Dies entspricht einer durchschnittlichen Erzeugung von 110 kWh pro Tag. Dies entspricht ca. 25% der Antriebsenergie (→ 440 kWh / Tag).

☞ Mit der PV-Anlage können ca. 25% der benötigten Antriebsenergie lokal und erneuerbar gedeckt werden.

Im nachfolgenden Diagramm wird der Energiefluss eines durchschnittlichen Tages genauer untersucht.

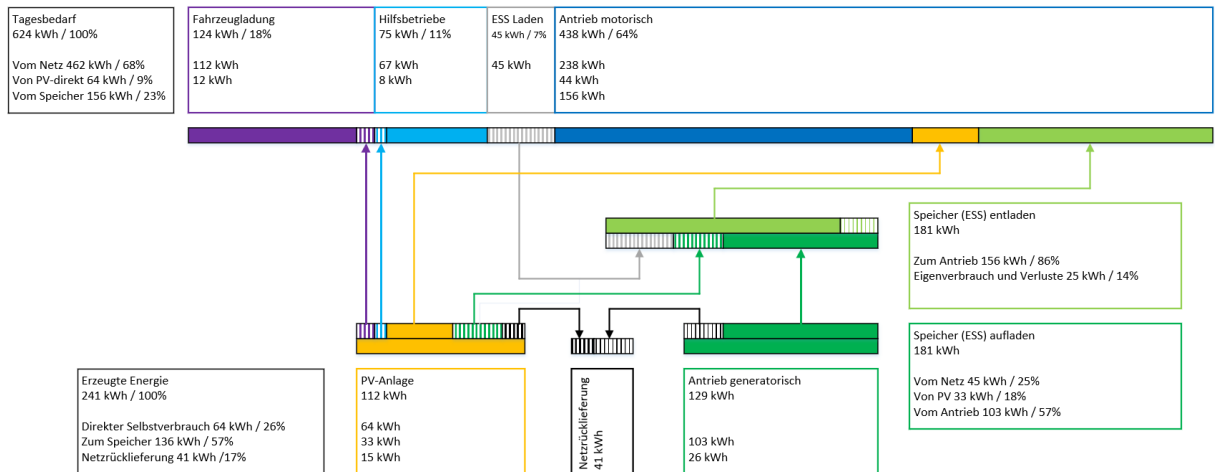


Abbildung 9: Gesamter Energiefluss

Unten links sieht man, wie die erzeugte erneuerbare Energie der PV-Anlage (112 kWh) verwendet wird. Die Nutzung erfolgt erstens:

- "direkt" für die Fahrzeugladung → violette Säule, 12 kWh oder 11%
- "direkt" für die Hilfsbetriebe → hellblaue Säule, 8 kWh oder 7%
- "direkt" für den Antrieb → gelbe Säule, 44 kWh oder 39%

Dieser "direkte" Anteil entspricht 64 kWh oder 57% der erzeugten erneuerbaren Energie der PV-Anlage.

Zweitens wird sie:

- "indirekt" zwischengespeichert → grüne Säule mit Muster, 33 kWh oder 30%

Drittens wird sie:

- ins Netz zurückgeliefert → schwarze Säule mit Muster, 15 kWh oder 13%

Unten rechts sieht man, wie die generatorische Energie (129 kWh) des Antriebs verwendet wird.

Einerseits wird sie:

- ins Netz zurückgeliefert → schwarze Säule mit Muster, 26 kWh oder 20%

Andererseits wird sie:

- "indirekt" zwischengespeichert → grüne Säule, 103 kWh oder 80%

In der Mitte rechts sieht man den Energiefluss (181 kWh) des Speichers.

Zum einen wird das Speichersystem aufgeladen:

- Vom Netz in der Nacht → graue Säule mit Muster, 45 kWh oder 25%
- Von der PV-Anlage → grüne Säule mit Muster, 33 kWh oder 18%
- Vom Antrieb → grüne Säule, 103 kWh oder 57%

Zum anderen wird das Speichersystem entladen:

- Für den Antrieb → hellgrüne Säule, 156 kWh oder 86%
- Durch Verluste und Eigenverbrauch → hellgrüne Säule mit Muster, 25 kWh oder 14%

Oben sieht man die Aufteilung des Energiebedarfs (642 kWh). Folgende Verbraucher beziehen Energie vom Netz oder von der PV-Anlage oder vom Speicher:

- Fahrzeugladung (Heizung) → violette Säule, 124 kWh oder 18%
- Hilfsbetriebe → hellblaue Säule, 75 kWh oder 11%
- Speicher in der Nacht → graue Säule mit Muster, 45 kWh oder 7%
- Antrieb → dunkelblaue Säule, 438 kWh oder 64%

☞ Fazit

Dank der Mehrfachnutzung des Speichersystems kann auch die "rekuperierte" Bremsenergie vom Antrieb wiederverwendet werden. Die **gesamte eigenverbrauchte Energie entspricht ca. 32% des gesamten Energiebedarfs**. Die Antriebsenergie kann zu 46% von PV-Anlage und Speicher gedeckt werden. Zusammengefasst liegt der **Eigenverbrauchsgrad** der "rekuperierten" Bremsenergie und der PV-Anlage **bei 83%**.

5 Zusammenfassung in einer zweiten Landessprache

Motivation et étude de faisabilité de 2017

Selon les opérateurs de remontées mécaniques [1] et les fournisseurs d'installations de transport à câble (Doppelmayr / Garaventa), les coûts énergétiques représentent la moitié des coûts d'exploitation⁵. Une grande partie de ceux-ci se retrouvent dans la facturation mensuelle de la puissance de pointe.

Les prix de rétribution de l'énergie électrique étant bas, il est aujourd'hui logique d'autoconsommer l'énergie de freinage (→ récupération) du convertisseur de fréquence ainsi que l'énergie produite par l'installation photovoltaïque (→ Production PV).



Pour rendre ceci possible, l'énergie doit être temporairement stockée localement.

Avec les systèmes à va-et-vient, le sens de rotation de la roue motrice change à chaque cycle. Les voitures ou les cabines restent immobiles entre chaque course, car les passagers doivent monter et descendre. Dans ce cas, le câble de traction "oscille" en fonction du cycle de conduite. Contrairement aux systèmes à mouvement continu, la puissance d'entraînement fluctue massivement.

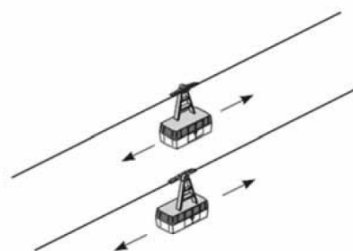


Abbildung 10: Système à-va-et-vient

Source [2], page 10.

Selon le profil de la ligne ou selon le cas de charge [1], la puissance d'entraînement peut même être négative. Cette énergie est réinjectée dans le réseau électrique. En raison de cette puissance d'entraînement fortement fluctuante, les systèmes à va-et-vient sont particulièrement intéressants dans le contexte de ce projet. En juillet 2017, environ 900 mesures ont été réalisées sur l'installation "Bienne-Macolin". Voir source [3], page 19.

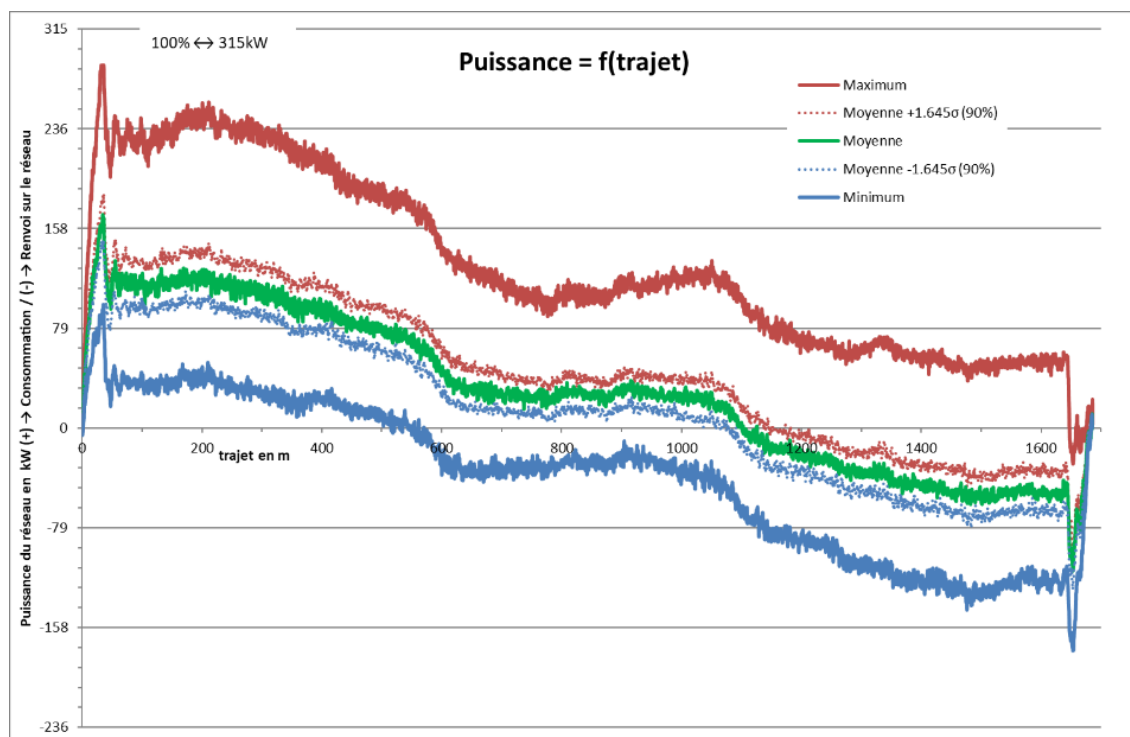


Abbildung 11: Mesure de puissance en juillet 2017



Au niveau de l'entraînement, le taux moyen de récupération d'énergie se situe à 32%.

⁵ Dans la branche des remontées mécaniques, les frais de personnel et l'amortissement de l'installation ne font pas partie des coûts d'exploitation.

Selon les normes européennes harmonisées des installations de transport à câble, ces dernières doivent présenter un concept de sauvetage. Ce concept consiste en la fourniture d'un entraînement indépendant, appelé "entraînement de secours". En cas de panne de courant ou de dysfonctionnement de l'entraînement principal, l'entraînement de secours est utilisé. Dans la majorité des cas, le carburant diesel est utilisé comme source d'énergie pour l'entraînement de secours.

☞ L'installation de stockage envisagée dans le projet peut aussi servir de source d'énergie pour l'entraînement de secours.

Innovation

Dans ce projet, l'innovation réside dans l'utilisation d'un système de stockage d'énergie pouvant garantir plusieurs fonctions :

- Récupérer l'énergie de freinage et la réutiliser pour la prochaine course
- Réduire les pics de puissance du système d'entraînement lors de l'accélération
- Stocker temporairement la production d'énergie électrique d'origine renouvelable (→ PV, éolien) ou d'un couplage de chaleur-force (→ CCF) lorsque l'installation est à l'arrêt et de l'utiliser pour la prochaine course
- En cas de panne de courant, le système de stockage d'énergie peut également être utilisée comme source d'énergie pour l'entraînement de secours
- L'intégration complète du système de gestion du stockage d'énergie avec la commande de la remontée mécanique (→ en fonction de la charge) est garantie

Grâce à l'utilisation multiple du stockage d'énergie, la consommation d'énergie électrique des entreprises de remontées mécaniques peut être fortement réduite. En conséquence, la facture d'électricité et les coûts d'exploitation de ces entreprises peuvent être réduits. En outre, la proportion d'énergie renouvelable autoproduite dans le bilan énergétique peut être augmentée.

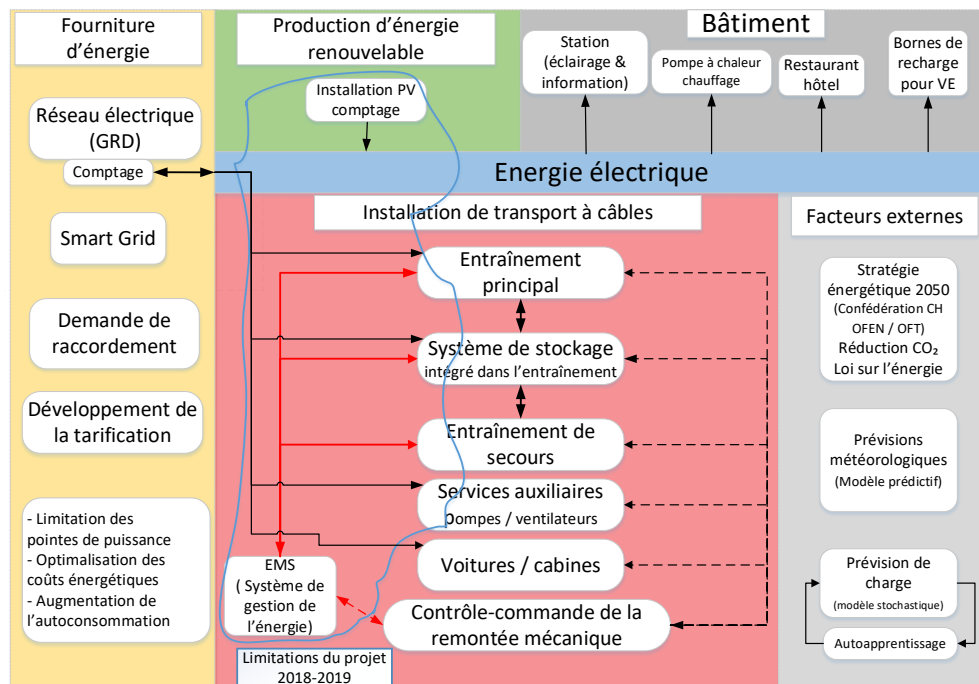
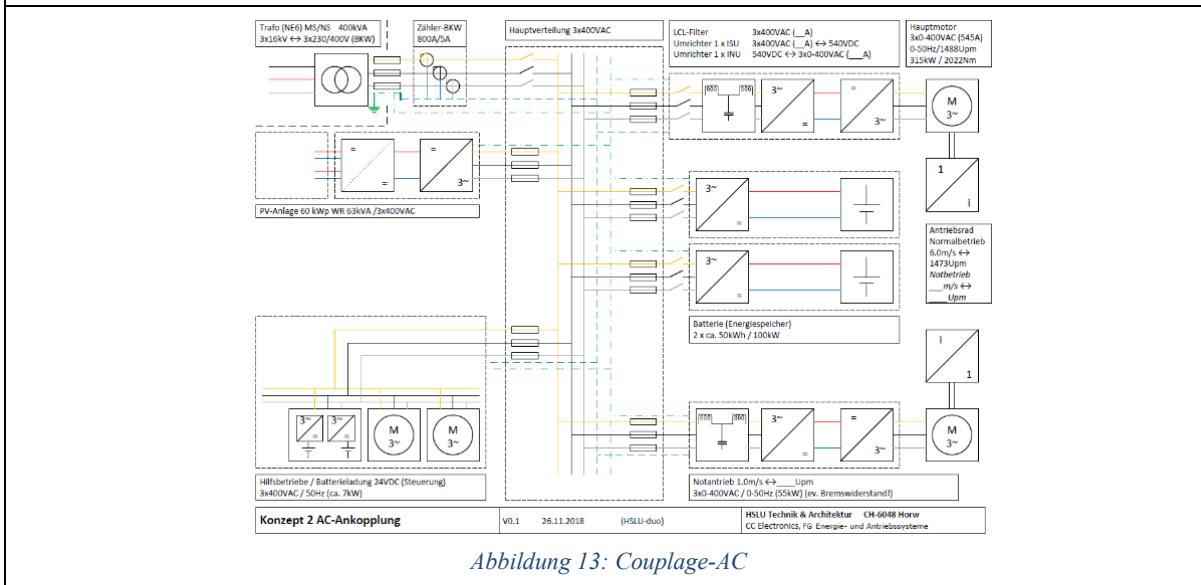


Abbildung 12: Concept général

☞ Une telle combinaison de ces solutions n'existe pas encore dans les systèmes de transport à câble.

Concept et mise en œuvre

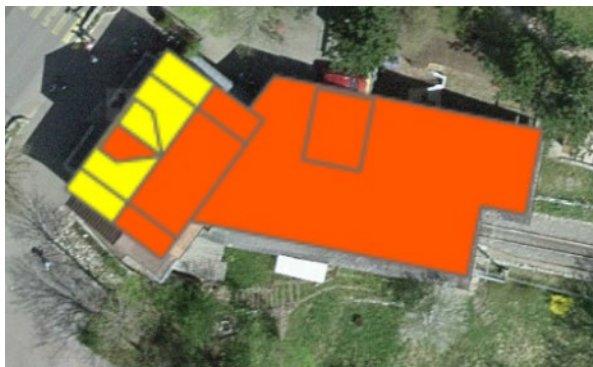
Un concept de couplage est nécessaire entre le réseau public de distribution, le système de stockage et l'installation photovoltaïque. Ce concept est représenté ci-dessous :



- (+) Composants standards et disponibles sur le marché pour l'implémentation de la solution
- (+) Flexible et évolutif (par exemple, capacité de stockage), "Retrofit" pour systèmes existants
- (-) 3 conversions d'énergie entre le stockage d'énergie et le moteur. Autoconsommation réduite

👉 Ce concept de couplage pouvait déjà être mis en œuvre en 2019 et a été ainsi sélectionné pour le projet-pilote du funiculaire "Bienne – Macolin".

Les valeurs théoriques du site internet "Sonnendach.ch" sont présentées ci-dessous avec la version réalisée en septembre 2020 pour le funiculaire "Bienne – Macolin".



Source : Sonnendach.ch

Surface du toit : 297 m², aptitude : "Très bonne"
 Orientation : 101 °, inclinaison : 17 °
 Potentiel de production à 75% : 36'750 kWh / an
 Puissance de crête : 41 kWc

Abbildung 14: Installation photovoltaïque (→ PV) de Macolin



Source : Helion et vb/tpb

Potentiel de production : 40'360 kWh / an
 Puissance de crête : 42 kWc

👉 Pour que l'installation PV soit financièrement intéressante, l'autoconsommation de l'électricité produite doit être la plus élevée possible. Ceci rend l'utilisation de production photovoltaïque pour une installation de transports à câble particulièrement intéressante, car elle fonctionne tous les jours de la semaine et de l'année.

Résultats

Seulement système de stockage

Le funiculaire “Bienna – Macolin” a été rénové et est à nouveau en fonction depuis le 31 août 2019. Depuis cette date, les flux d'énergie sont mesurés. Dans le graphique à droite, l'énergie pour les services auxiliaires (contrôle-commande, agrégat hydraulique, ventilateur du moteur principal) et l'énergie pour la charge du véhicule (batterie embarquée pour l'éclairage, les ventilateurs, le contrôle-commande et le chauffage des voitures en hiver) sont représentées graphiquement.

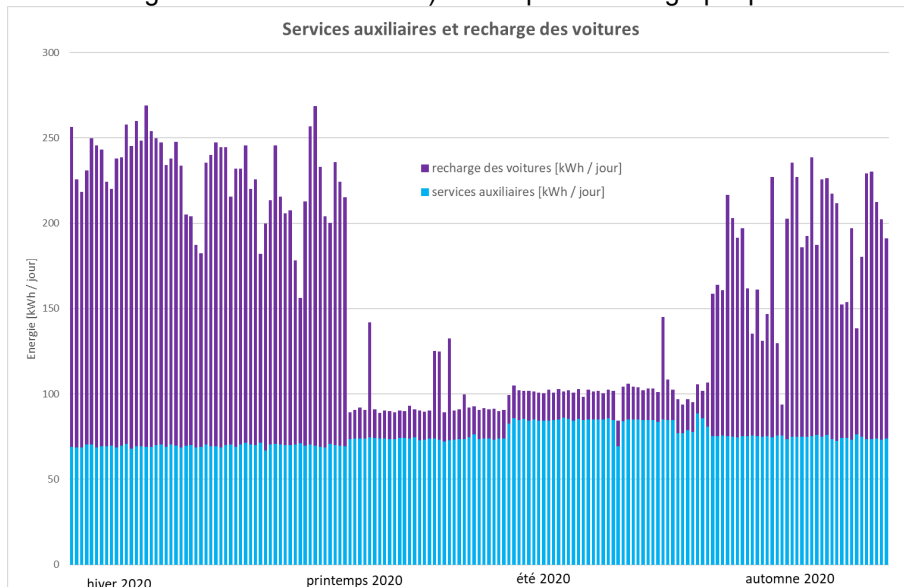


Abbildung 15: Energie quotidienne: services auxiliaires et recharge des voitures

Au cours de l'année 2020, l'énergie journalière pour les services auxiliaires était d'environ 75 kWh. En été, cette valeur est augmentée (\rightarrow env. +10 kWh / jour), car le ventilateur pour le refroidissement du moteur principal devait fonctionner de manière plus fréquente.

L'hiver 2020 n'a pas été particulièrement froid, mais l'énergie de chauffage quotidienne était de l'ordre de 200 kWh. Durant les premiers mois d'exploitation, le thermostat et les radiateurs ont été mieux réglés. En été, l'énergie pour recharger les voitures était d'environ 15 kWh / jour. Ceci explique la différence des coûts d'électricité du T1/T4 par rapport au T2/T3.

L'énergie journalière motrice (+) et génératrice (-) du système d'entraînement sont représentées graphiquement. De plus, l'énergie refoulée sur le réseau électrique et le niveau d'autoconsommation de l'énergie de freinage “récupérée” sont également représentés graphiquement.

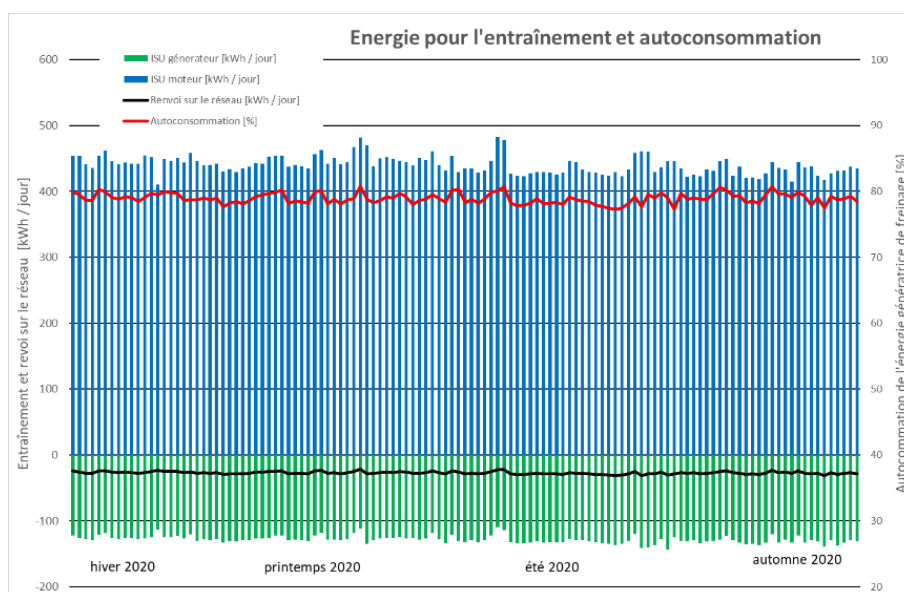


Abbildung 16: Énergie quotidienne: énergie pour l'entraînement et autoconsommation

Le convertisseur de fréquence consomme environ 440 kWh par jour (→ colonne bleue) et génère environ 128 kWh par jour (→ colonne verte). Le taux moyen de récupération au niveau de l'entraînement est de 29%. Grâce au système de stockage, seuls 27 kWh environ sont refoulés sur le réseau (→ ligne noire). Il en résulte un degré moyen d'autoconsommation de 79% (→ ligne rouge avec échelle de l'axe-Y à droite).

En d'autres termes, cela signifie que l'opérateur du funiculaire peut réduire l'énergie consommée depuis le réseau d'environ 101 kWh par jour.

➡ Grâce au système de stockage d'énergie, le taux d'autoconsommation atteint 79%. Cela signifie également que seulement 21% de l'énergie de freinage doit être restituée au réseau électrique. En 2017, la proportion d'énergie de freinage restituée au réseau était encore de 82%.

Combinaison installation photovoltaïque (→ PV) avec le système de stockage

L'installation PV est intégrée à la commande du funiculaire depuis le 18 septembre 2020. Cela signifie que l'énergie renouvelable produite peut être utilisée directement dans le système d'entraînement ou pour la recharge du véhicule et les services auxiliaires.

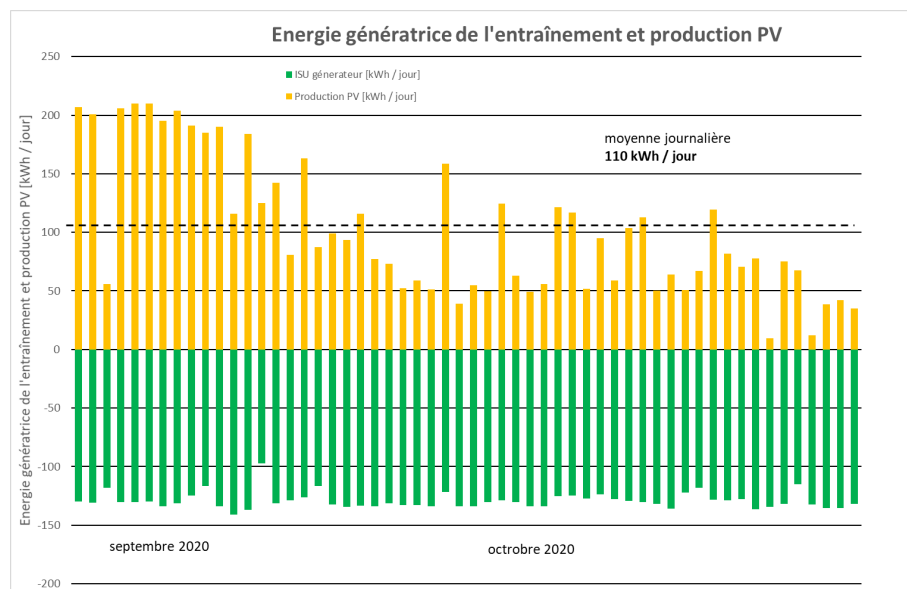


Abbildung 17: Énergie quotidienne: énergie génératrice de l'entraînement et production PV

Selon le fournisseur du système PV, le potentiel de production annuel est de 40'360 kWh / an. Cela correspond à une production moyenne de 110 kWh par jour. Ceci permet de couvrir environ 25% de l'énergie de l'entraînement principal (→ 440 kWh / jour).

➡ Avec l'installation photovoltaïque, environ 25% de l'énergie consommée par l'entraînement peut être couverte par de l'énergie renouvelable produite localement.

Dans le diagramme suivant, le flux d'énergie d'une journée moyenne est examiné de plus près.

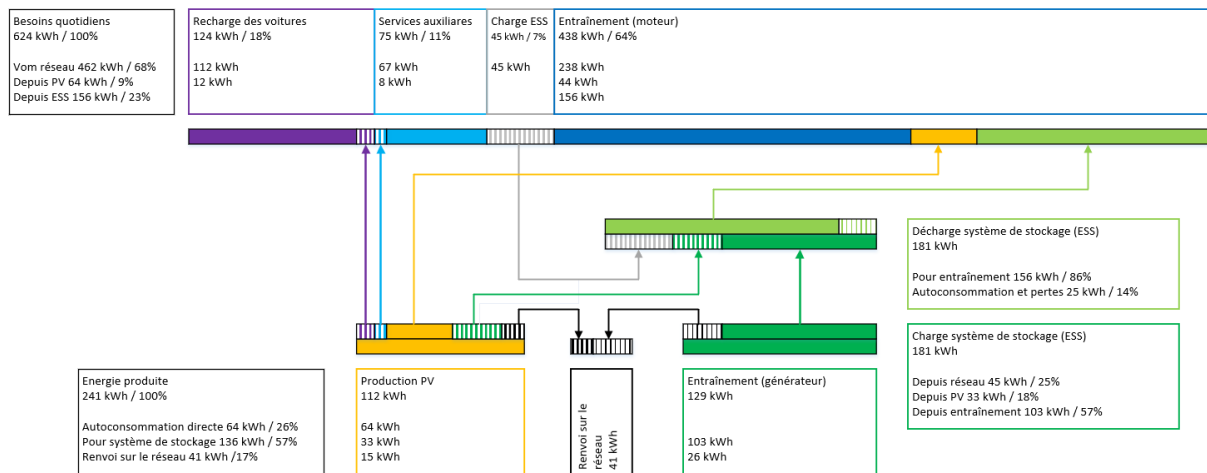


Abbildung 18: Flux d'énergies globaux

En bas à gauche, vous pouvez voir comment l'énergie renouvelable générée par l'installation PV (112 kWh) est utilisée. Premièrement, elle est répartie de cette façon :

- "directe" pour la recharge des voitures → colonne violette, 12 kWh ou 11%
- "directe" pour les services auxiliaires → colonne bleu clair, 8 kWh ou 7%
- "directe" pour l'entraînement → colonne jaune, 44 kWh ou 39%

Cette part "direct" correspond à 64 kWh soit à 57% de l'énergie renouvelable produite localement par le système PV.

Deuxièmement, elle est répartie de cette façon :

- "indirecte" par un stockage intermédiaire → colonne verte avec motif, 33 kWh ou 30%

Troisièmement, elle est :

- renvoyée au réseau → colonne noire avec motif, 15 kWh ou 13%

En bas à droite, vous pouvez voir comment l'énergie régénérative (129 kWh) du système d'entraînement est utilisée.

D'une part, elle est :

- renvoyée au réseau → colonne noire avec motif, 26 kWh ou 20%

D'autre part, elle est utilisée de cette façon :

- "indirecte" par un stockage intermédiaire → colonne verte, 103 kWh ou 80%

Au milieu à droite, vous pouvez voir le flux d'énergie (181 kWh) du système de stockage.

D'une part, le système de stockage est chargé :

- depuis le réseau pendant la nuit → colonne grise avec motif, 45 kWh ou 25%
- depuis l'installation PV → colonne verte avec motif, 33 kWh ou 18%
- depuis l'entraînement → colonne verte, 103 kWh ou 57%

En revanche, le système de stockage est déchargé :

- pour le système d'entraînement → colonne vert clair, 156 kWh ou 86%
- par pertes et consommation propre → colonne vert clair avec motif, 25 kWh ou 14%

Ci-dessus, vous pouvez voir la répartition de la consommation d'énergie totale (642 kWh). Les consommateurs suivants soutirent leur énergie du réseau, du système PV ou du système de stockage :

- charge du véhicule (chauffage) → colonne violette, 124 kWh ou 18%
- service auxiliaires → colonne bleu clair, 75 kWh ou 11%
- système de stockage de nuit → colonne grise avec motif, 45 kWh ou 7%
- entraînement → colonne bleu foncé, 438 kWh ou 64%

Conclusion

Grâce à l'utilisation multiple du système de stockage, l'énergie de freinage "récupérée" du variateur de l'entraînement peut également être réutilisée. **L'énergie autoconsommée totale atteint environ 32% des besoins énergétiques totaux.** L'énergie d'entraînement peut être couverte à 46% par le système PV et le système de stockage. En résumé, **le niveau d'autoconsommation de l'énergie de freinage "récupérée" et du système PV est de 83%.**

Energiemanagement Bergbahnen mit Zwischenspeicher für PV und Rekuperation

Standseilbahn “Biel / Bienne – Magglingen / Macolin”

Projektdauer: 2018 - 2021



Quelle: VB / TBP

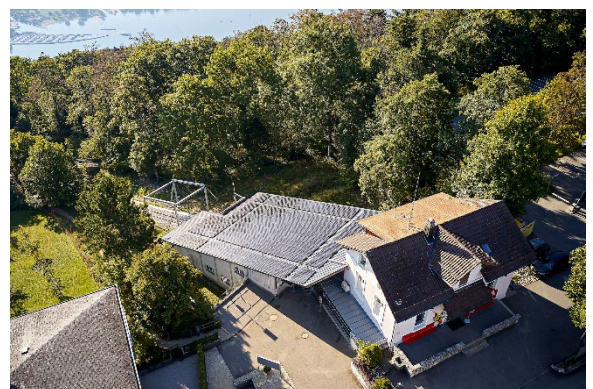
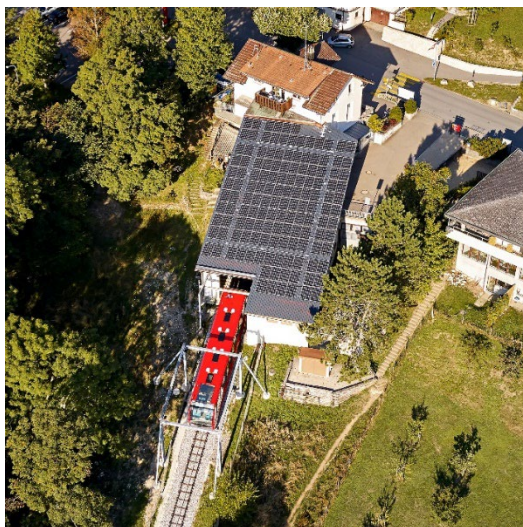


Abbildung 19: Bildimpressionen zum Projekt

1. Ausgangslage

1-1 ALLGEMEINER KONTEXT

Gemäss BFE [4], Seite 3, bezieht der öffentliche Verkehr (öV) ca. 8% des gesamten Stromverbrauchs. Dies entspricht 4.7 Millionen MWh oder dem Verbrauch von ca.1 Million Haushalte⁶.

Fig. 2 Stromverbrauch 2019 nach Kundenkategorien
Parts des catégories de clients en 2019

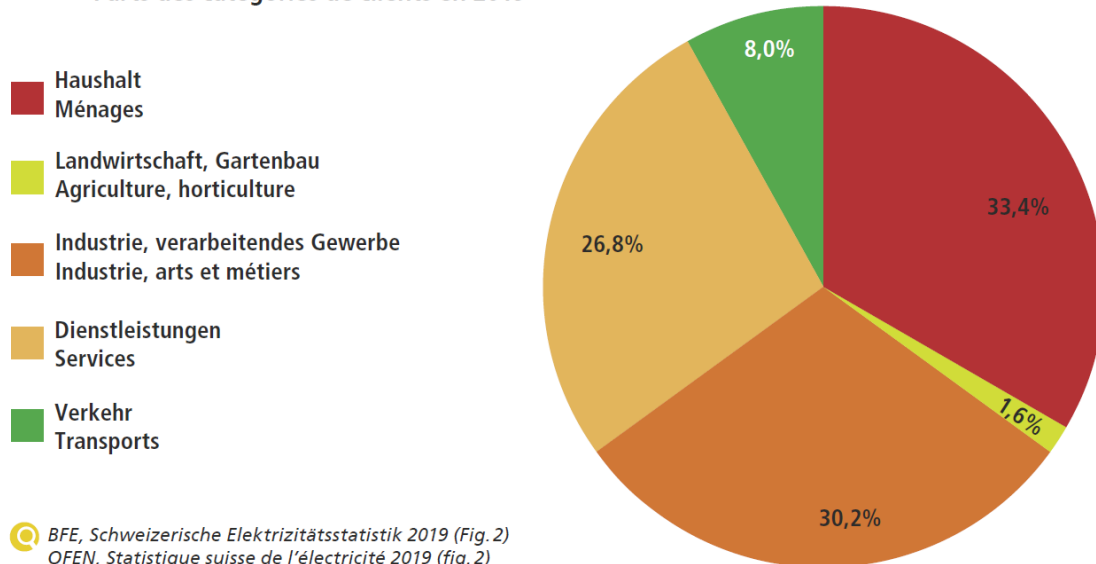


Abbildung 20: Stromverbrauch nach Kundenkategorie

Nach der Reaktorkatastrophe [5] von Fukushima im Jahr 2011 haben Bundesrat und Parlament den schrittweisen Ausstieg der Schweiz aus der Kernenergie beschlossen. Dieser Entscheid sowie weitere tiefgreifende Veränderungen im internationalen Energieumfeld, bedingen einen Umbau des Schweizer Energiesystems. Hierfür hat der Bundesrat die Energiestrategie 2050 erarbeitet.

Aus diesem Grund hat das BAV seit 2013 im Auftrag des Bundesrats das Energiesparprogramm ESöV 2050 für den öffentlichen Verkehr lanciert. Es soll dazu beitragen:

- die **Energieeffizienz** im öffentlichen Verkehr **zu verbessern**
- den vom Bundesrat beschlossenen **Ausstieg aus der Kernenergie** zu ermöglichen
- die **Produktion erneuerbarer Energie** zu fördern
- und den **CO₂-Ausstoss des öV** zu senken

⁶ Siehe <https://www.strompreis.elcom.admin.ch/Map/ShowSwissMap.aspx>
Verbrauchskategorie H3 bzw. H4 → 4'500 kWh/a

1-2 PROJEKTKONTEXT

Gemäss Seilbahnbetreibern [1] und Seilbahnlieferanten (Doppelmayr / Garaventa) liegen die Energiekosten bei der Hälfte der Betriebskosten⁷. Ein grosser Anteil davon machen die Abrechnung der Monatsleistung oder die sogenannte Spitzenleistung aus. Siehe Abschnitt 1-5.

Da die Vergütung für die Rückspeisung von elektrischer Energie tief liegt, macht es heutzutage Sinn die Bremsenergie (Rekuperation) des Antriebs sowie die eigene von einer PV-Anlage erzeugte Energie selbst zu verbrauchen. Um dies zu ermöglichen, muss die Energie in einem lokalen Speicher zwischengespeichert werden.

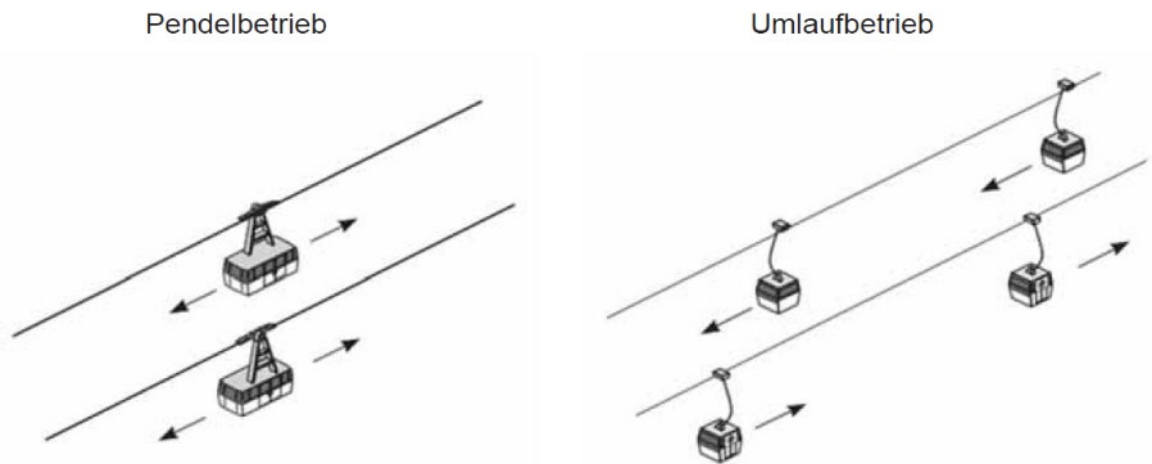
Der Speicher muss optimal ausgelegt, im Antriebskreis integriert und intelligent gesteuert werden. Ausserdem müssen die Wirtschaftlichkeit und die Machbarkeit der gesamten Lösung sowie das systemische Umfeld und die Erweiterungsmöglichkeiten berücksichtigt werden.

Als Einstieg werden nachfolgend die wichtigen Begriffe zu diesem Projektthema erläutert.

1-3 SEILBAHNEN

Unter dem Begriff "Seilbahnen" sind viele mögliche Varianten zusammengefasst. Grundsätzlich gibt es mindestens ein Zugseil. Je nach Verhalten der Drehrichtung des Antriebsrads unterscheiden sich die Systeme in 2 Hauptkategorien:

Unterscheidung nach der Betriebsweise



Quelle: [2], Seite 10

Abbildung 21: Pendel- und Umlaufbetrieb

Umlaufbetrieb

Bei diesem System dreht das Antriebsrad immer vorwärts. Das Förderseil läuft die ganze Betriebszeit um das Antriebsrad. Dies erklärt den Kategoriennamen. Die bezogene Antriebsleistung ist quasi konstant während der Betriebszeit. Zu diesem System zählen folgende Anlagentypen:

- Feste und kuppelbare Sesselbahnen
- Kuppelbare Gondelbahnen
- 2S- bzw. 3S-Bahnen
- Skilifte

Aus energetischen sowie aus baulichen Gründen macht es Sinn den Antrieb in der Bergstation zu bauen. Als Voraussetzung muss eine leistungsfähige Stromversorgung in der Bergstation vorhanden sein.

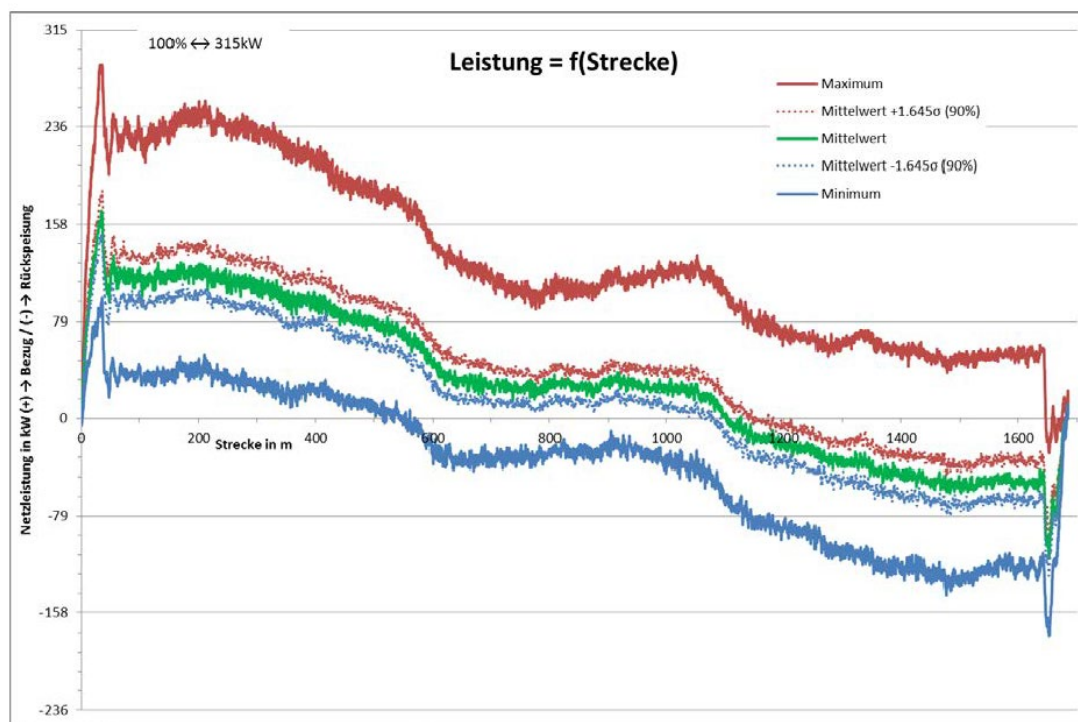
⁷ In der Seilbahnbranche gehören die Amortisations- sowie die Personalkosten nicht zu den Betriebskosten.

Pendelbetrieb

Bei diesem System wechselt die Drehrichtung des Antriebsrades bei jedem Zyklus. Zwischen 2 Zyklen steht die Anlage still, da die Fahrgäste aus- bzw. einsteigen müssen. In diesen Fall pendelt das Zugseil je nach Fahrzyklus. Im Gegensatz zu den Umlaufbahnen schwankt die Antriebsleistung massiv. Zu diesem System zählen folgende Anlagentypen:

- Luftseilbahnen
- Standseilbahnen
- Windenbahn
- Funifor
- Aufzüge haben ein ähnliches System aber gehören gesetzlich nicht zu den Seilbahnen

Je nach Streckenprofil oder Lastfall [1] kann die Antriebsleistung sogar negativ sein. Der Antrieb speist ins Netz zurück. Aufgrund dieser stark fluktuierenden Antriebsleistung sind Pendelbahnen für diesen Projektkontext besonders interessant. Im Juli 2017 wurden ca. 900 Messfahrten auf der Anlage "Biel-Magglingen" durchgeführt



Quelle [3] , Seite 19

Abbildung 22: Leistungsmessung vom Juli 2017

Die Seilbahnen sind i.d.R. mit einem Elektromotor in Kombination mit einem Übersetzungsgetriebe angetrieben. Bezogen aus dem Netz, wurde die elektrische Energie mit verschiedenen Technologien in mechanische Energie umgewandelt. Nachfolgend sind die verwendeten Technologien chronologisch aufgelistet:

- Gleichstrommaschine mit "Ward-Leonard" Umformer (Ab 1885 bis 1970er)
- Gleichstrommaschine mit Stromrichter (Thyristor) (ab 1970er)
- Asynchronmaschine mit Frequenzumrichter (IGBT) (ab 1995er)

Alle diese Maschinensysteme sind rückspeisefähig oder gehören zu den 4-Quadrantenantrieben.

Natürlich gibt es auch andere Antriebskonzepte wie zum Beispiel:

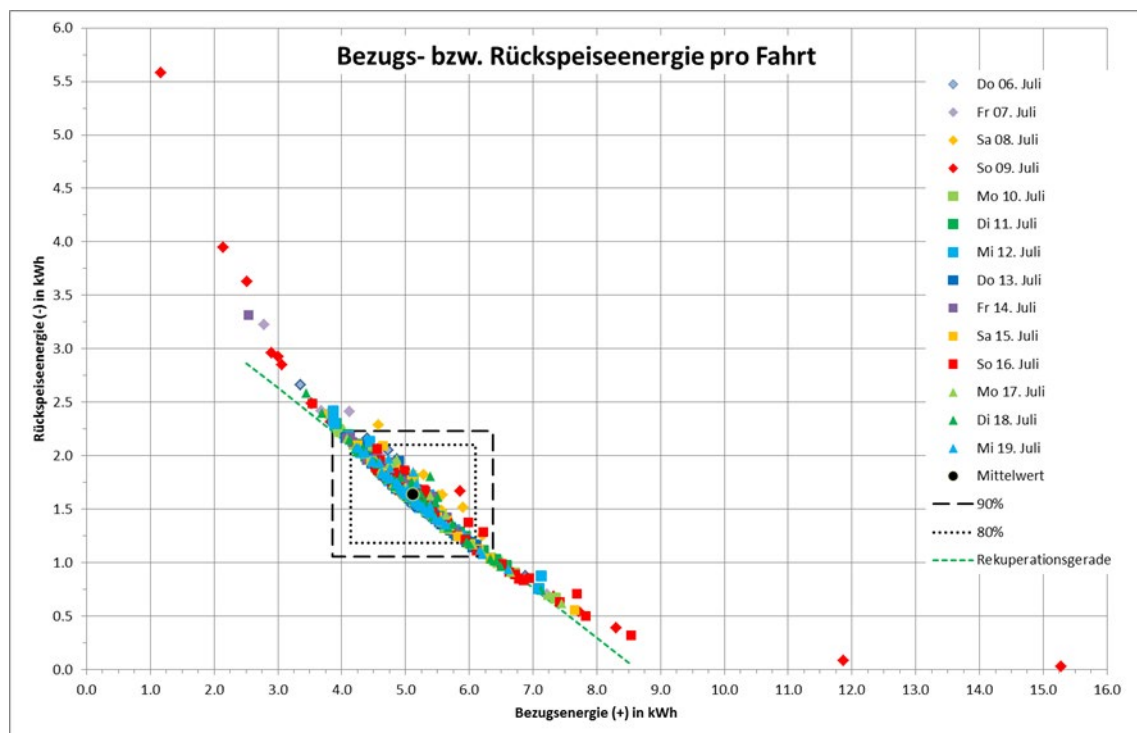
- Wasserballast oder Schwerkraftantrieb
- "Sector Drive" mit permanenterregter Synchronmotor [6], Seite 5
- "Direct Drive" ohne Übersetzungsgetriebe [6], Seite 6



Quelle Autor (ABB ACS 800, 3 x 400VAC / 800 kW)

Abbildung 23: Antriebsumrichter

Untenstehend werden diese Messfahrten analysiert [3] und ausgewertet und das Verhältnis Bezugsenergie zur Rücklieferenergie wurde graphisch dargestellt.



Quelle [3] , Seite 16

Abbildung 24: Energiemessung vom Juli 2017

☞ Am Antrieb liegt der durchschnittliche Rekuperationsgrad der Energie bei 32%.

1-4 BETRIEBLICHE ASPEKTE

Je nach Bauart können die Pendelbahnen in vielen Bereichen eingesetzt werden.

- Tourismusgebiete (Winter- bzw. Sommersport)
- Stadtgebiete (öffentlicher Verkehr)
- Infrastruktur im Berggebiet (Stauseen, Windkraftanlagen, Telekommunikationsantennen)
- Lokale Interessen (Alpweid, Bauernhof, Alprestaurant)

Die betrieblichen Eckdaten sind in dieser Tabelle zusammengefasst:

Bereich	Tourismus- gebiet	Stadtgebiet öV	Infrastruktur	Lokale Interessen
Anlagen Typ	Luftseilbahn Standseilbahn	Standseilbahn Luftseilbahn	Luftseilbahn Windenbahn	Luftseilbahn
Gefässgrösse	100-200	50-150	5	4-12
Fahrgeschwindigkeit in m/s	bis 10	5-6	bis 5	bis 5
Leistung in kW	150-400	100-350	ca. 50	20-50
Betriebstage pro Jahr	180	360	50	150
Fahrten pro Tag	20-40	40-80	4	10
Fahrten pro Jahr	5'400	21'600	200	1'500

Tabelle 1: Betriebliche Eckdaten von Pendelbahnen

☞ Da der Energiebedarf proportional zur Anzahl der Fahrten liegt, ist ein Speichersystem interessant für den öffentlichen Verkehr oder für die Tourismusgebiete. Für lokale Interessen macht es Sinn, wenn die Stromanschlusskosten sehr hoch sind. Ein Inselbetrieb der Anlage könnte in Frage kommen.

1-5 ENERGIEASPEKTE

Infolge der Teilliberalisierung des Elektrizitätsmarktes⁸ (2009) werden die Energiekosten und die Netzkosten separat abgerechnet. Für Grosskunden (> 100'000 kWh/Jahr) gibt es die Möglichkeit, die Energie auf dem freien Markt zu beziehen. Dies erklärt, weshalb die Energiekosten und die Netznutzungskosten separat verrechnet werden.

Im Juli 2017 [3] wurde die Antriebsenergie der Standseilbahn "Biel-Magglingen" während 15 Tagen gemessen. Die Anlage gehört zum Versorgungsgebiet der BKW und zählt zu den "Geschäftskunden"⁹ bei diesem EVU.

Zusammengefasst über das ganze Jahr 2017 verteilen sich die Kosten wie folgt:

- | | | | |
|-------------------|-----|--------|-------------------------------------|
| - Energiekosten | ca. | 44% | (Hoch- bzw. Niedertarif) |
| - Netzkosten | ca. | 16% | (Hoch- bzw. Niedertarif) |
| - Leistungskosten | ca. | 29% | (Monatliche höchste ¼-h-Leistung) |
| - Grundpreis | ca. | 3% | (Abo und SDL) |
| - Abgaben | ca. | 8% | (Förderabgabe und Gemeindeleistung) |
| - Rücklieferung | ca. | - 3.5% | |

Die bezogene Energie im Hochtarif (7h00 – 21h00) liegt bei 78% der gesamten Bezugsenergie, aber die Kosten (Energie + Netz) im Hochtarif entsprechen 85% der gesamten Bezugsenergiekosten.

⁸ <https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/energie/oeffnung-strommarkt.html>

⁹ https://www.bkw.ch/fileadmin/user_upload/1_Private/1_6_Netzdienstleistungen/20395_TB_Netznutzung_Gross-Industriekunden_D.pdf

Der Anteil der Rückspeiseenergie liegt bei ca. 19% der bezogenen Energie. Da die Rücklieferungspreise, aufgrund der Überproduktion im europäischen Markt, sehr tief liegen, macht dies auf der Stromrechnung nur -3.5% aus. Das Verhältnis Bezugspreis mit allen Angaben zum Rücklieferungspreis lag im Jahr 2017 bei 5 zu 1.

Aus diesen Gründen machte es Sinn:

- Die Rücklieferenergie so tief wie möglich zu halten
- Die Bezugsenergie so wenig wie möglich im Hochtarif zu beziehen
- Die Leistungskosten bzw. Spitzenleistung zu reduzieren

☞ Alle diese Gründe sprechen dafür, ein Speichersystem zu betreiben.

2. Ziele der Arbeit

2-1 EINLEITUNG

Aus den im Kapitel 1 erläuterten Rahmenbedingungen, ergeben sich für dieses Projekt verschiedene Ziele:

- Bestimmung der "rekuperierten Energie" und deren Einflussfaktor
- Einbindung der erzeugten erneuerbaren Energie einer "PV-Anlage"
- Evaluieren von anderen möglichen Nutzungen des Speichers
- Auswahl der Speichertechnologie
- Auslegung der Komponenten
- Wirtschaftlichkeit der Lösung

Untenstehend werden die Ziele genauer beschrieben.

2-2 "REKUPERIERTE" BREMSENERGIE SPEICHERN

Im Juli 2017 wurden die Energiedaten der Standseilbahn "Biel-Magglingen" zwei Wochen lang gemessen. Anschliessend wurden die Ergebnisse sowie eine Analyse in einem internen Bericht [3] dokumentiert. Gemäss dieser Machbarkeitsstudie belief sich der durchschnittliche Rekuperationsgrad des Antriebs auf ca. 33%. Dies bedeutet, dass ein Drittel der bezogenen Antriebsenergie ins Netz zurückgespeist wird.

Diese Energie könnte in einem Speicher zwischengespeichert und für die nächste Fahrt wiederverwendet werden.

Zuerst müssen die mechanischen Grundlagen erarbeitet werden, damit die potentielle rekuperierte Bremsenergie berechnet werden kann. Danach können die Faktoren, welche einen Einfluss auf die potentielle rekuperierte Bremsenergie haben, ermittelt werden.

Anschliessend können die Kriterien, welche für die Auslegung des Speichers relevant sind, festgelegt werden.

2-3 PV-ENERGIE NUTZEN

Damit die erzeugte erneuerbare Energie der PV-Anlage optimal verwendet werden kann, müssen die Auslegungskriterien der PV-Anlage ermittelt werden. Ausserdem kann bei der Auslegung des Speichers die Einbindung einer vorgesehenen PV-Anlage berücksichtigt werden.

2-4 NOTANTRIEB BZW. NOTBETRIEB

Gemäss den harmonisierten europäischen Seilbahnnormen EN12929-1:2015 und EN13223:2015 müssen die Pendelbahnen sowie auch die Umlaufbahnen einen Bergeplan vorlegen. Je nach Streckenprofil und Topografie kann eine Treppe bzw. ein Rettungsweg entlang der Schiene (→ Standseilbahnen) gebaut werden.



Quelle: <https://www.niesen.ch/de/galerie/bahn-bilder/?oid=1810&lang=de>

Abbildung 25: Treppe entlang der Strecke

Falls die Topografie keinen Treppenbau (→ Umlaufbahnen, Luftseilbahnen) ermöglicht, muss ein anderes Konzept vorliegen. Zum Beispiel ist das Beistellen eines unabhängigen Antriebes, welcher als "Notantrieb" bezeichnet wird. Im Falle eines Stromausfalles oder bei einer Störung im Hauptantrieb kommt der Notantrieb zum Einsatz. Meistens ist die Energiequelle dieses Notantriebs Dieseltreibstoff.

Die Umwandlung von Treibstoff bis zur Energie am Antriebsrad erfolgt durch zwei verschiedene Lösungen:

- Dieselmotor mit Hydraulikpumpe – Ölleitungen –
Hydraulikmotor mit Getriebe
- Dieselmotor mit Generator – Frequenzumrichter –
Elektromotor mit Getriebe



Quelle: Autor

Abbildung 26: Elektrischer Notantrieb

☞ Der im Projekt vorgesehene Speicher könnte als Energiequelle für den Notantrieb dienen.

Im Falle eines Stromausfalles könnte die Seilbahn mit dem Hauptantrieb mit einer reduzierten Geschwindigkeit weiterbetrieben werden. Hier könnte sich der vorgesehene Speicher als Energiequelle eignen. Das ist der sogenannte "Notbetrieb".

Um diese beiden Fälle (Notantrieb und Notbetrieb) abdecken zu können, ergeben sich weitere Kriterien für die Auslegung des Speichers.

2-5 TECHNOLOGIEWAHL DES SPEICHERS

In Bezug auf die erwähnten Punkte können die Eckdaten des Speichers (Energie in kWh und Leistung in kW) berechnet werden. Je nach Verhältnis zwischen Energie und Leistung kommen verschiedene Technologien in Frage. Deshalb werden die Kriterien (Leistungsdichte, Energiedichte, Preis, ...) genauer untersucht.

Ausserdem braucht es einen Batterieumrichter zwischen dem Speicher und dem Antrieb. Verschiedene mögliche Ankopplungsvarianten werden untersucht und analysiert.

2-6 BEWIRTSCHAFTUNG DES SPEICHERS

Je nach Wahl der Technologie oder Systemlösung können die oben erwähnten Wünsche ganz oder nur teilweise erfüllt werden. Im Projekt wird tiefer auf die optimale Bewirtschaftung der gesamten Lösung eingegangen. Ausserdem werden die möglichen Energie- bzw. Kostenersparnisse erläutert.

3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

3-1 VORGEHEN

Damit die oben erwähnten Ziele (siehe Abschnitt 2) erreicht werden können, wird dieses Projekt wesentlich in 5 Hauptphasen abgewickelt werden. Nachfolgend werden die Zwischenziele jeder Phase kurz beschrieben:

- 1 Schnittstelle sowie Interaktionen zwischen den verschiedenen Anlageteilen sind definiert. Betrachtetes System ist abgegrenzt.
- 2 Mess- sowie Betriebsdaten werden erfasst und darauf basierend die Berechnungsgrundlagen für den Schritt drei erarbeitet.
- 3 Auf Basis der Berechnungsgrundlagen können Varianten vorgeschlagen und anschließend bewertet werden. Zudem werden die Detailfragen beantwortet sowie diverse Abklärungen mit den Behörden getroffen.
- 4 Die beste Variante aus Schritt drei wird umgesetzt. Die Anlage ist durch die Behörden geprüft und die Prüfungsergebnisse sind dokumentiert.
- 5 Mittels Nachmessungen vor Ort können die erwarteten Resultate bestätigt und dann die Schlussdokumentation erstellt werden. Interne Schulungen werden durch die Projektbeteiligten organisiert. Durch aktive Teilnahme an Fachveranstaltungen kann das Knowhow transferiert werden. Gleichzeitig werden auch Fachartikel verfasst.

3-2 STAND DER TECHNIK 2018

Im Bereich des öffentlichen Verkehrs (TUs) kommen bereits Lösungen für die Rekuperierung der Bremsenergie von U-Bahnen zum Einsatz, damit diese wieder für die nächste Beschleunigungsphase eingesetzt werden kann. Dabei geht es um hohe und kurze Leistungsspitzen. Diese Lösungen werden mit Superkondensatoren oder "Ultracaps" umgesetzt. Siehe die Referenz [7] von der Firma Sécheron SA in Genf.

Als das Projekt 2018 eingereicht wurde, sind bereits Kombinationen zwischen Seilbahnanlagen und Speicher gebaut worden. Nachfolgend werden 2 Anlagen detailliert beschrieben [8] :

Luftseilbahn Brest

In der Stadt Brest in Frankreich baute die Firma Bartholet [9] eine Luftseilbahn, die einen Fluss (Die Penfeld) quert. Die beiden Stationen der Anlage befinden sich fast auf gleicher Meereshöhe, es gibt aber ungefähr in der Streckenmitte eine markante Stütze.

Diese Seilbahn, welche im November 2016 in Betrieb gesetzt wurde, weist aufgrund der Stütze einen sehr ungünstigen Lastgang auf, da der Antrieb beide Fahrzeuge fast gleichzeitig zur Stütze hochziehen und anschliessend beim Runterfahren wieder beide Fahrzeuge abbremsen muss. Die Firmen Bartholet (Maschinenbau), Seirel (Seilbahnsteuerung) und Leroy-Somer (Antriebstechnik) haben in Brest dieses Problem mit Superkondensatoren gelöst. Fahren die Fahrzeuge in Richtung Stütze hoch, wird ein Teil der dafür benötigten Leistung aus den Superkondensatoren bezogen. Fahren die Fahrzeuge von der Stütze runter, werden die Superkondensatoren mit der Bremsenergie wieder aufgeladen.



Quelle: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Penfeld#/media/Fichier:Telepherique-Brest-fin-Sept-16-4.jpg>



Quelle: [10]

Abbildung 27: LSB "Brest" und LSB "Frümsen – Staubern"

Luftseilbahn Frümsen – Staubern

Im Jahr 2018 wurde in der Schweiz die neue Seilbahn von Frümsen zum Berggasthaus Staubern [10] eröffnet. Die Stationen dieser kleinen Luftseilbahn (2 Kabinen für je 8 Personen) sind mit Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) ausgerüstet und in der Antriebsstation, welche sich in der Talstation befindet, gibt es einen Batteriespeicher.

Der Betreiber hat das Ziel, die Bahn möglichst unabhängig vom Stromnetz zu betreiben. Der Seilbahnantrieb bezieht die Energie von der PV-Anlage und bei Bedarf, je nach Sonneneinstrahlung und Fahrgastaufkommen, zusätzlich vom Batteriespeicher. Ist die Produktion der PV-Anlagen grösser als der Verbrauch der Seilbahn, wird die überschüssige Energie im Batteriespeicher gespeichert. Die Seilbahn wurde realisiert durch die Firmen Barholet (Maschinenbau) und Sisag (Steuerung und Antriebstechnik). Der Batteriespeicher stammt von der Firma Tesla.

Innovation

In diesem Projekt liegt die Innovation beim Einsatz eines Speichers, welcher mehrere Funktionalitäten gewährleisten kann.

- Bremsenergie rekuperieren und für die nächste Fahrt wiedereinsetzen
- Leistungsspitze des Antriebes beim Beschleunigen brechen
- Energie einer EEA (PV, Windkraft) oder einer Wärme-Kraft-Kopplung beim Anhalten der Bahn zwischenspeichern und erst bei der nächsten Fahrt verwenden.
- Im Falle eines Stromausfalles kann der Speicher zusätzlich auch als Notantrieb benutzt werden
- Die volle Integration des Energiemanagementsystems des Speichers mit der Bahnsteuerung (Lastabhängig) ist gewährleistet

Dank der Mehrfachnutzung des Speichers kann der Energiebezug der Bergbahn stark reduziert werden. Als Folge können die Stromrechnung sowie die Betriebskosten der Bergbahngesellschaften gesenkt werden. Zudem kann der Anteil der selbst erzeugten erneuerbaren Energie in der Energiebilanz gesteigert werden.

Eine solche Kombination dieser erwähnten Lösungen existiert für die Verwendung bei Bergbahnen noch nicht. Dieses Konzept ist hier unten ersichtlich.

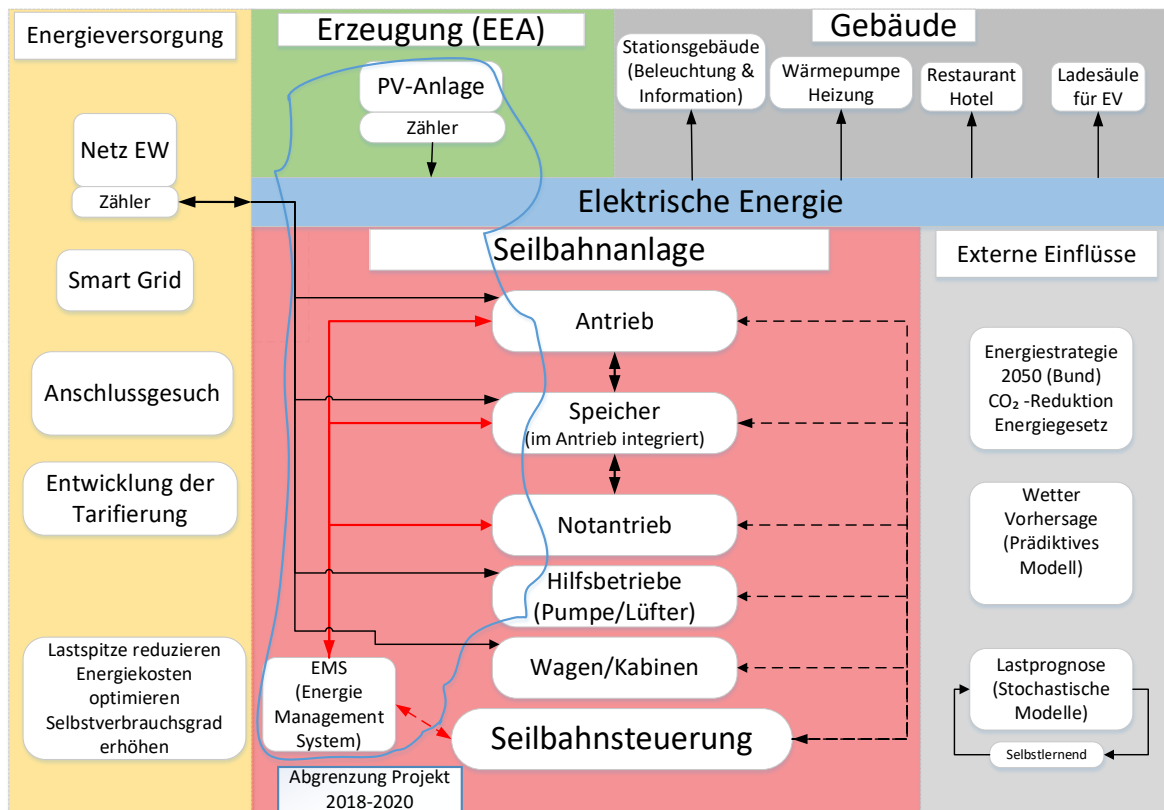


Abbildung 28: Allgemeines Konzept

3-3 SPEICHERUNG DER ENERGIE

Die Speicherung der elektrischen Energie ist seit mehr als 100 Jahren ein Thema. Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, wie zum Beispiel:

- | | |
|--------------------|--------------------------|
| - Akkumulatoren | chemisch |
| - Brennstoffzellen | chemisch |
| - Redox Flow | chemisch |
| - Power-to-Gas | chemisch |
| - Kondensatoren | elektrostatisches Feld |
| - Spulen | elektromagnetisches Feld |
| - Stausee | potenzielle Energie |
| - Schwungrad | kinetische Energie |
| - Druckluft | potenzielle Energie |

Hier werden diese Technologien in einem Ragon-Diagramm [11] veranschaulicht:

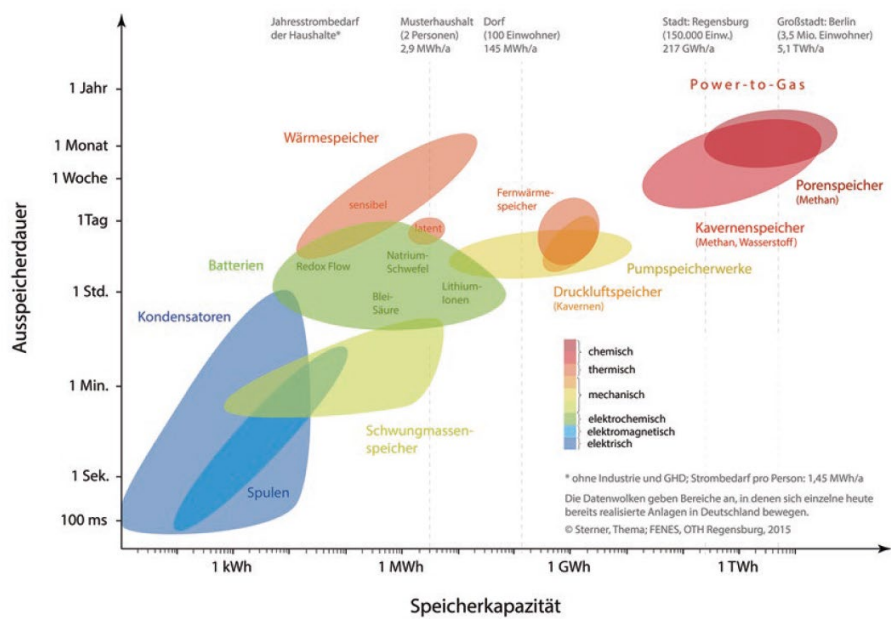


Abbildung 29: Speichertechnologie

Laut Abschnitt 7.4 im Anhang, wird der Speicher mit einem Zyklus pro Tag (ca. 16 Std) betrieben und die Energiemenge liegt im Bereich von 50-100 kWh. Gemäss Abbildung 29 kommen nur 2 Technologien infrage. Die Vor- und Nachteile der beiden Technologien werden kurz zusammengefasst.

Die unterliegenden Werte sind Richtwerte und können je nach Hersteller und Grösse der Packungen variieren:

Kriterien	Einheit	SCAPs ¹⁰	Batterien Li-Ion ¹¹
Energiedichte	Wh/dm ³	6-9	ca. 100
Energiedichte	Wh/kg	4-6	50-200
Leistungsdichte	W/kg	ca. 1000	ca. 200
Ratio Leistung / Energie	kW/kWh	200 @ I=C/10	Von 2 bis 10
Anzahl Vollzyklen	-	1 Mio.	2000 bis 15'000
Kalendarische Lebensdauer	Jahr	10 Jahre @ 25°C	Bis ca. 10 Jahren
Zellenpreis ohne Integration (2017) Für niedrige Stückzahlen	€/kWh	12'000	300

Tabelle 2: SCAPs und Li-Ion Batterien

¹⁰ <http://spscap.de/supercap-zellen.html> und <https://shop24.capcomp.de/ultrakondensatoren/zellen/3000f-bis-10000f/>

¹¹ http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries und http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion

Bemerkung

Die erwähnten Preise verstehen sich ohne MwSt. und auf die gleiche Kapazität bezogen. Von einer Zelle zu einem funktionsfähigen, integrierten Batteriesystem braucht man eine sogenannte Integration.

Der ehemalige Preis (2017) der Li-Zelle für grössere Stückzahlen lag bei ca. 300 €/kWh, dazu müssen noch die Integrationskosten der Batterie zu einem sicher funktionierenden Energiespeicher gerechnet werden, das heisst konkret:

Batteriemanagement-System (BMS) mit:

- Zellenüberwachung (Spannung, Temperatur)
- Überwachung der Lade- und Entladephasen
- Kühlung bzw. Heizung der Batterie
- Schnittstelle mit der übergeordneten Steuerung (Energie Management System)
- Warnung, Alarm und Diagnostik

Von der Zelle zum Modul wird der Preis pro kWh Energieinhalt verdoppelt. Vom Modul bis zum voll integrierten Speicher ergibt sich zusätzlich ein Zuschlag von 50%.

SCAPs oder Batterien

Technologie SCAPs

Aufgrund der hohen Zyklenfestigkeit der SCAPs macht es Sinn, diese nur für die Energiemenge einer Fahrt auszulegen. Gemäss der geschätzten Lebensdauer (10 Jahre) wäre dann eine voraussichtliche Belastung von ca. 240'000 Zyklen zu erwarten.

Gemäss [3] werden mindestens 2.23 kWh als Rückspeiseenergie benötigt.

Dazu müssen noch ca. 80% der Sonnenenergie aus der PV-Anlage gespeichert werden. In diesem Fall würde es Sinn machen, wenn die Energie für die nächste Fahrt gespeichert wird. Hier würde der Speicher ca. 5.32 kWh speichern. Bei einer 7'-Haltezeit ergibt dies eine benötigte PV-Leistung von 45 kW. Das wäre machbar und ist in diesem Fall nicht begrenzend.

Ausserdem dient der Speicher auch als Notantrieb und benötigt in diesem Fall eine Energie von 6.37 kWh.

Insgesamt muss der SCAPs-Speicher eine Energie von 5.32 kWh + 6.37 kWh = 11.7 kWh speichern.

Dafür muss ein Budget ohne Integration von ca. 140'000€ eingerechnet werden. Mit der gesamten Integration wird ein Budget von ca. 420'000€ benötigt.

Technologie Batterien

Aufgrund der niedrigen Zyklenanzahl der Li-Ion Batterien macht es Sinn, die Energie nicht pro Fahrt, sondern pro Tag zu speichern. Gemäss geschätzter Lebensdauer (10 Jahre) wird die voraussichtliche Beanspruchung bei ca. 3'650 Zyklen liegen. Das wäre tragbar für herkömmliche Li-Ion Batterien.

Meistens sind die Batterien bei der Leistung begrenzt. Aus diesem Grund werden die Batterien mit einer Bezugsleistung von 140 kW (90% der Energie, siehe Abbildung 22 und Abbildung 24) dimensioniert. Aus dieser Leistung wird die Speichergösse abgeleitet. Mit einer pessimistischen Annahme von 2 kW pro kWh ergibt dies einen Speicher von ca. 70 kWh. Die Zellkosten betragen ca. 21'000 €. Mit der gesamten Integration wird ein Budget von ca. 65'000 € benötigt.

In diesem Fall werden die Rückspeiseleistung des Antriebs (75 kW beim Fall 90%, siehe Abbildung 22 und Abbildung 24) sowie die erzeugte Leistung der PV-Anlage (42 kW_p, siehe Abbildung 32) nicht eingeschränkt.

☞ Die Lösung mit SCAPs ist viel teurer als diejenige mit Batterien. Aus diesem Grund wird diese Lösung nicht weiterverfolgt. Die Li-Ion Batterien werden weiter untersucht.

Folglich müssen die verschiedenen Technologien der Batterien evaluiert werden. Im Anschluss werden detailliert die Kenngrößen von verschiedenen Technologien veranschaulicht.

Kriterien	Einheit	NMC	LFP	LTO	Zebra
Englischer Name		Nickel Mangan- ese Cobalt Oxide	Lithium iron phosphate	Lithium titanate	Sodium- nickel chloride
Energiedichte (gravimetrisch)	Wh/kg	150	100	90	85
Spannung (Nominal) Min. / Max	V	3.7 3.0 / 4.2	3.2 2.5 / 3.6	2.3 1.6 / 2.7	2.6 2.1 / 3.0
Entlade-Rate (Nominal) (Max)	I/I_{nom}	1C 2C	1C 2C	1C 4C	0.25C 0.5C
Auflade-Rate (Nominal) (Max)	I/I_{nom}	1C 2C	0.5C 1C	1C 4C	0.25C -
Anzahl Vollzyklen	-	4'500 @ 100% DoD 8'000 @ 80% DoD	8'000 @ 80% DoD	15'000 @ 100% DoD	>4'500 @ 80% DoD
Sicherheit	-	Ab 210°C, thermal runaway	Ab 270°C, thermal runaway, but very safe	The safest Li-Ion Batteries	Very safe. No Li
Lebenserwartung	Jahr	10	10	20	10
Preis pro Modul (ca. 48VDC)	€/kWh	600	1000	1200	800

Tabelle 3: Technologie der Batterien

3-4 ENERGIEWANDLUNG

Ankopplung DC

Folgende Abbildung zeigt das ursprüngliche Konzept, welches im Herbst 2017 besprochen wurde.

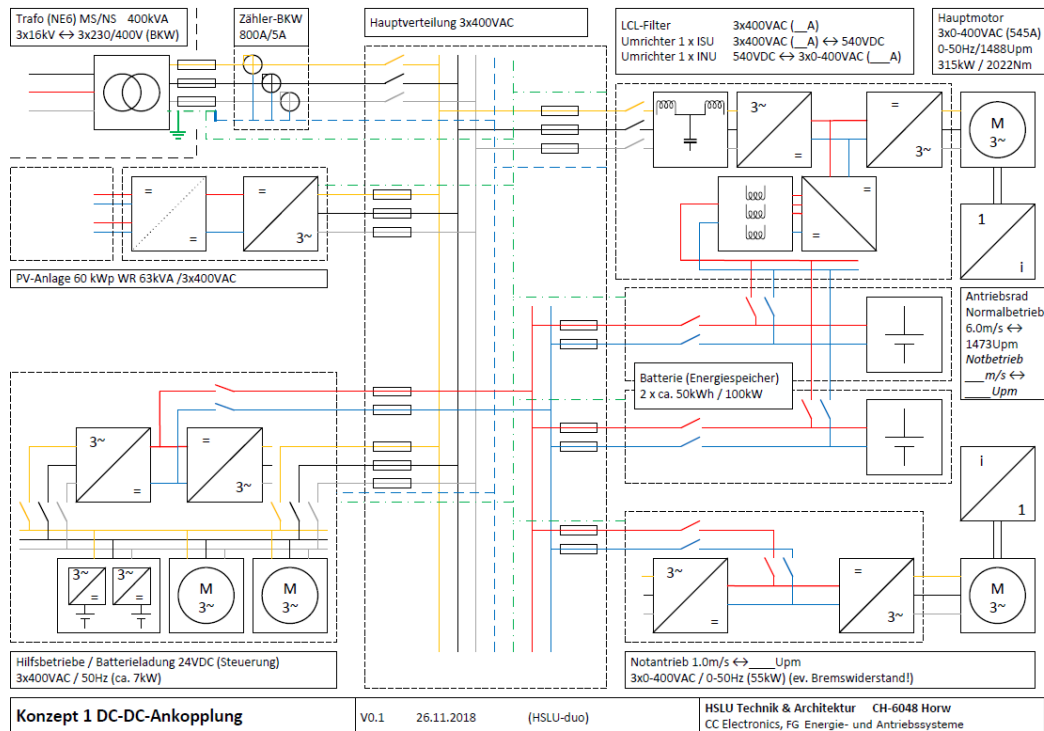


Abbildung 30: DC-Ankopplung

- (+) Batteriespeicher speist direkt den ZK ein. → Guter Wirkungsgrad
- (-) Inkompatibilität zwischen Batteriespannung und ZK-Spannung für Notantrieb
- (-) Netzumrichter (ISU) muss immer laufen, auch für die PV-Einspeisung
- (-) Grosser Eingriff in der Seilbahnsteuerung

Im Herbst 2018, war die vorgesehene Technologie noch nicht genügend reif für eine Umsetzung 2019. Aus diesem Grund wurde ein anderes Konzept erarbeitet.

Ankopplung AC

Aufgrund der Einschränkungen des ersten Konzeptes wurde ein zweites Konzept mit AC-Ankopplung erarbeitet.

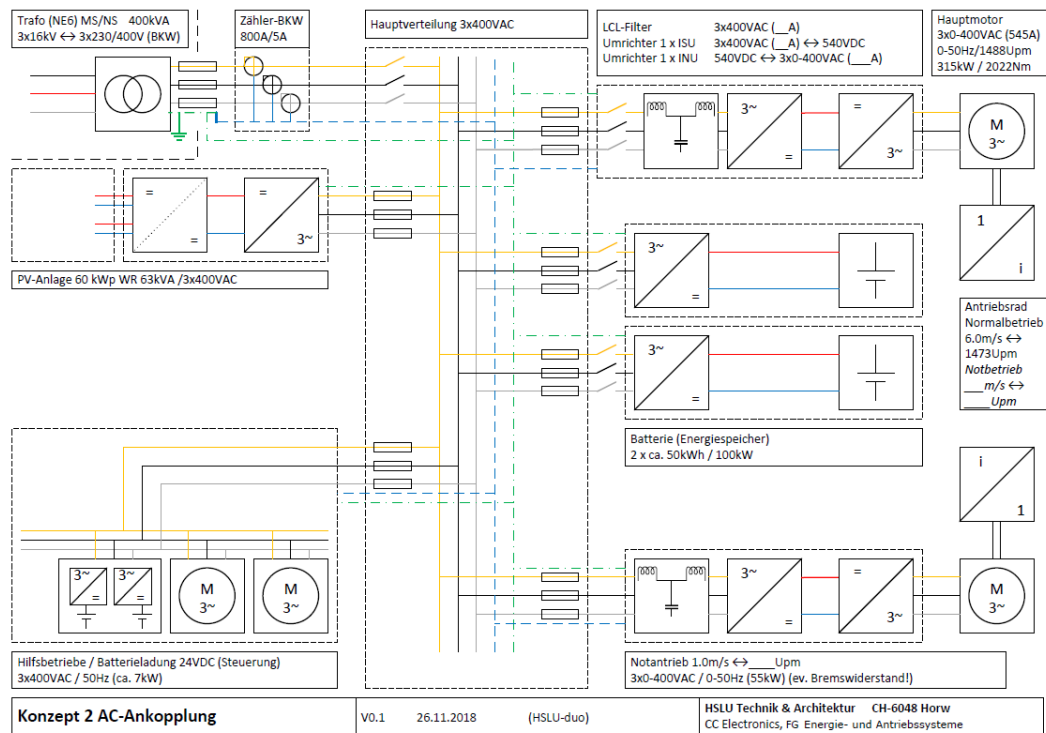


Abbildung 31: AC-Ankopplung

- (+) Standardkomponenten für die Umsetzung.
- (+) Flexibel, beliebig skalierbar (z.B. Speichergrößen), "Retrofit" der bestehenden Anlagen.
- (-) 3 Umwandlungen vom Batteriespeicher bis zum Motor. Reduzierter Eigenverbrauch.

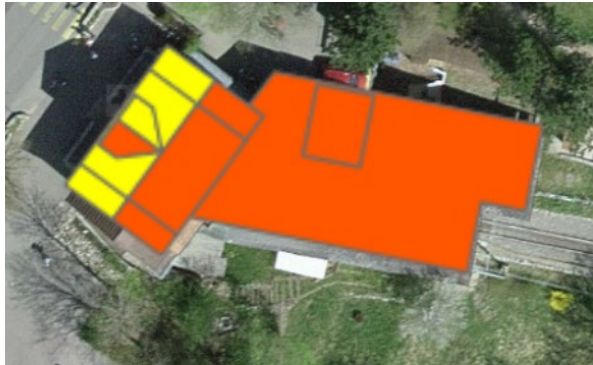
☞ Dieses AC-Konzept konnte schon 2019 umgesetzt werden und wurde für die Pilotanlage "Biel-Magglingen" ausgewählt.

3-5 PV-ANLAGE

Laut Swissolar¹² und Pronovo¹³, ist die Technologie von PV-Anlagen reif und der Erzeugungspreis (10 -15 Rp/kWh) liegt je nach Parameter unter dem Bezugspreis des EVU. Hier sind die wichtigsten Parameter aufgelistet:

- Grösse und Typ der Anlage
- Ausrichtung sowie Neigung der Anlage
- Standort der Anlage, siehe Sonnendach.ch¹⁴.
- Höhe der Anlage, d.h. über der Nebelgrenze

Nachfolgend werden die theoretischen Werte von der Webseite "Sonnendach.ch" mit der umgesetzten Version vom September 2020 für die Standseilbahn "Biel-Magglingen" abgebildet.



Quelle: Sonnendach.ch

Dachfläche: 297 m², Eignung: "Sehr gut"
Ausrichtung: 101°, Neigung: 17°
Ertragspotential bei 75%: 36'750 kWh / Jahr
Spitzenleistung: 41 kWp

Abbildung 32: PV-Anlage in Magglingen



Quelle: Helion und vbb/tpb

Ertragspotential: 40'360 kWh / Jahr
Spitzenleistung: 42 kWp

Damit eine gute Bewirtschaftung der PV-Anlage erreicht werden kann, muss der Eigenverbrauch des erzeugten Stromes so hoch wie möglich sein.

Dieser Umstand macht den Einsatz von Photovoltaik für eine Seilbahnanlage besonders interessant, da diese an allen Wochentagen in Betrieb ist. In diesem Fall kann die erzeugte Energie gut selbst verbraucht werden.

Ausserdem können die PV-Anlagen bis 100 kW mittels der Einmalvergütung für kleine Anlagen (KLEIV) gefördert werden.

Siehe auch: <https://pronovo.ch/de/services/tarifrechner/>

¹² <https://www.swissolar.ch/>

¹³ <https://pronovo.ch/>

¹⁴ <https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/sonnendach/?header=1&lang=de>

3-6 ENERGIEMANAGEMENT

Industrie

In der Industrie werden schon Leistungsspitzen aus Kostengründen reduziert. Als Lösungsansatz kommen intelligente Steuerungen in Frage, welche die unwichtigen Lasten verschieben, oder träge Prozesse (Heizung, Dampfaufbereitung, Kälte) verlagern können. Je nach Industrie kann auch die Druckluft gespeichert werden, dies ermöglicht es den Kompressor nur bei schwacher Gesamtlast zu betreiben.

Haushalt

Im Haushaltbereich sind viele Anbieter, welche Lösungen mit PV-Anlagen anbieten, aktiv. Ein paar Lösungsansätze sind nachfolgend aufgeführt:

- Leistung der Wärmepumpe der PV-Erzeugung angleichen
- Ladung des Elektroautos mit der PV-Erzeugung abstimmen
- Aufheizung des Elektroboilers mit der PV-Erzeugung abstimmen
- Einschalten der Haushaltgeräte (Geschirrspüler, Waschmaschine, Tumbler, ...) zum optimalen Zeitpunkt
- Batteriespeicher, falls vorhanden, optimal mit überschüssigem PV-Strom aufladen und später entladen

Öffentlicher Verkehr

Im Bereich des öffentlichen Verkehrs gibt es auch Bedürfnisse die Leistungsspitzen zu reduzieren. Mit der Einführung des Taktstundenfahrplans bei der SBB im Jahr 1982 sowie bei den anderen Personen-Transportunternehmen verursacht dieses gute Angebot grosse Leistungsspitzen. Der Grund dafür liegt bei dem gleichzeitigen Ankommen von vielen Zügen bei den Hauptknoten kurz vor der vollen Stunde sowie bei dem gleichzeitigen Anfahren von vielen Zügen bei den Hauptknoten kurz nach der vollen Stunde. Als Folge wurde verschiedenen Lösungsansätze erarbeitet:

- Nebenbetriebe (Wagenheizung) reduzieren während der Beschleunigungsphase
- Geschwindigkeit¹⁵ der Züge anpassen, d.h. "so schnell wie nötig"
- Andere grosse Bezüger (Weichenheizung¹⁶) kurzzeitig abschalten oder effizienter betreiben.

Bei allen diese Massnahmen geht es wesentlich um:

- Effizienzsteigerung von Systemen
- Ersetzen der Energiequelle, z.B. Wärmepumpen mit Erdsonden statt Elektroheizung

Beim vorliegenden Projekt muss die Ansteuerung des Speichers folgende 4 Kriterien erfüllen (nach Priorität geordnet).

1. Ladezustand des Speichers für eine Notfahrt gewährleisten
2. Maximale Bezugsleistung vom Netzanschluss minimieren
3. Rekuperieren von so viel Bremsenergie wie möglich, zur Wiederverwendung
4. Eigenverbrauch des erzeugten PVA-Stromes maximieren

Diese Bedingungen wurden in einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) von der Firma Beckhoff implementiert. Zudem wurde noch eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMI oder HMI) entwickelt.



Abbildung 33: Energiemanagementsteuerung

¹⁵ <https://www.srf.ch/play/tv/einstein/video/sbb-gruene-welle-auf-der-schiene?urn=urn:srf:video:d5a6289b-9d0d-4287-b99e-2a03c43211fa>

¹⁶ https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/themen/umwelt/energiestrategie-projekte/schlussbericht_065.pdf.download.pdf/Schlussbericht%20Projekt%20P-065.pdf

Einerseits können die wichtigen Parameter in der Visualisierung beobachtet werden, andererseits kann das Speichersystem angesteuert werden. Im Normalbetrieb läuft das Speichersystem vollautomatisch mit der Bahnsteuerung.

Hier wird die Ansicht “Übersicht” veranschaulicht.

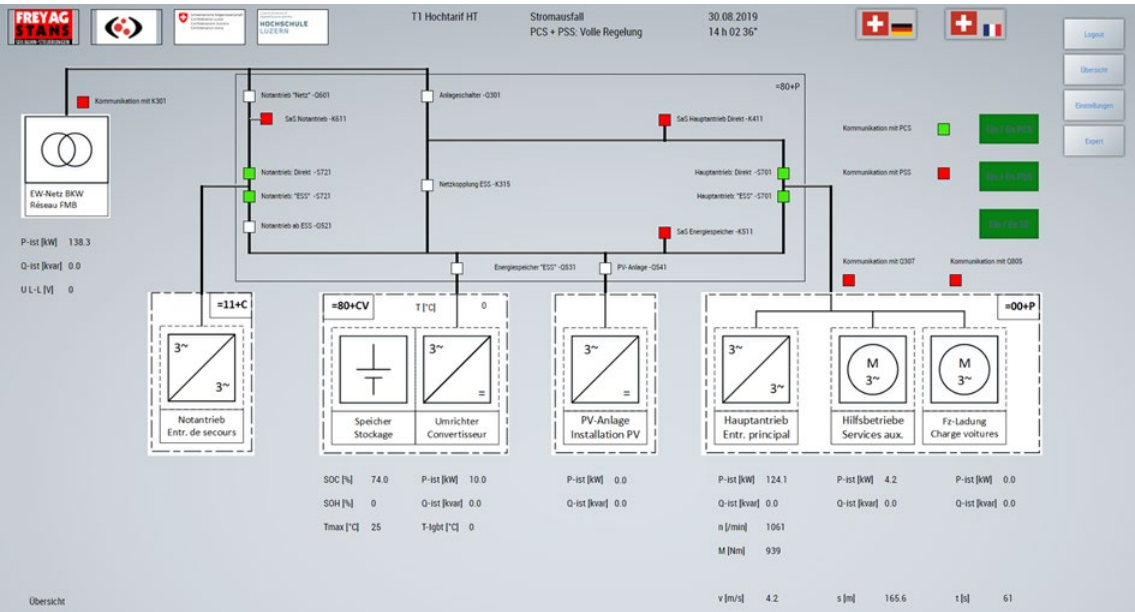


Abbildung 34: EMS, Ansicht “Übersicht”

Es können der Energiefluss sowie die wichtigen Betriebsdaten (→ Ladezustand-SOC, Temperatur, Kommunikation, ...) beobachtet werden.

Hier wird die Ansicht “Einstellungen” veranschaulicht.

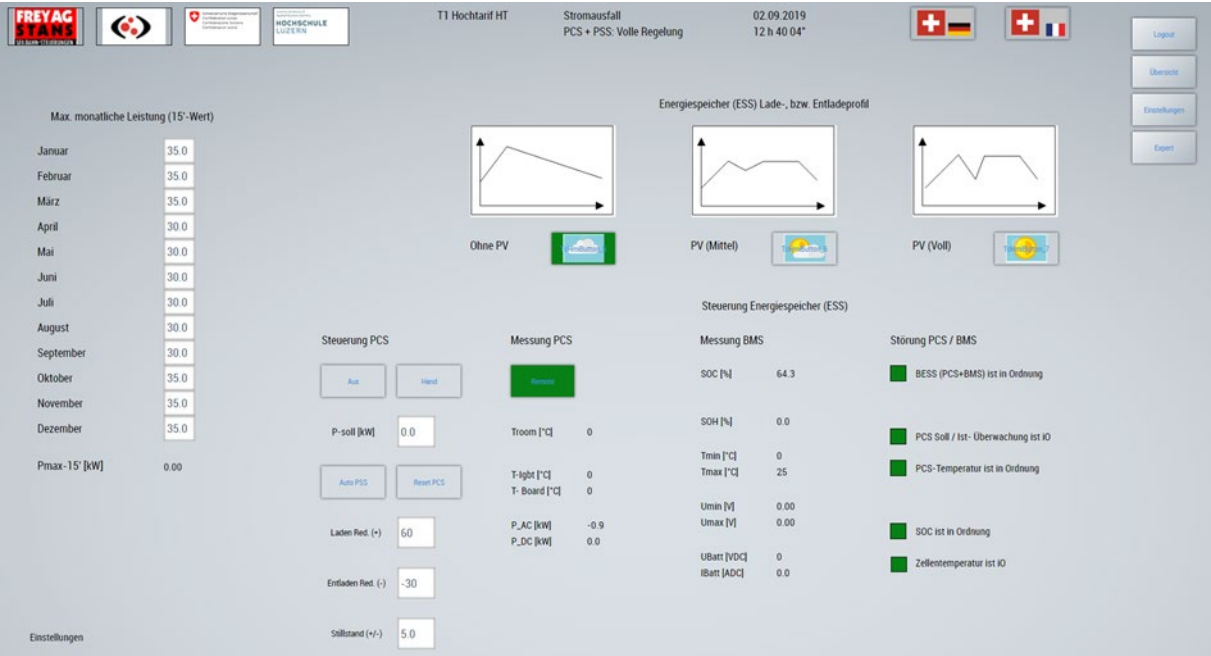


Abbildung 35: EMS, Ansicht “Einstellungen”

Einerseits können die Betriebsparameter (→ Steuerungsart des Speichersystems, PV-Programm,) eingestellt werden. Andererseits können genauere Messungen (→ DC und AC-seitig Messdaten) sowie die eventuellen Störungen des Speichersystems beobachtet werden.

4. Ergebnisse

4-1 PROJEKTPLANUNG

Hier werden die wichtigen Meilensteine zwischen den ersten Ideen 2015 und der vollen Integration des Speichersystems mit der Seilbahnanlage und der PV-Anlage im September 2020 aufgeführt.

- | | |
|----------------|--|
| Frühling 2015 | Seitens HSLU (O. Duvanel) erste Überlegungen über eine mögliche Kombination zwischen Speicher und Seilbahn. Zu dieser Zeit gab es noch keinen Marktbedarf. |
| Frühling 2017 | Anfrage vom VB/TPB bezüglich Kombination von PV-Anlage, Speicher für eine bessere Bewirtschaftung der Rückspeiseenergie. Hier ging es um die Sanierung der Anlage "Biel-Magglingen" im Frühling-Sommer 2019. |
| Mai 2017 | Erste Besprechung zwischen HSLU, Frey AG Stans und ABB. |
| Juli 2017 | 15-tägige Messungen auf der Anlage. |
| Sept. 2017 | Öffentliches Verfahren GATT/WTO-Abkommen für die Sanierung der Bahn. |
| Dez. 2017 | Machbarkeitsstudie [3] ist von der HSLU verfasst. |
| | |
| Jan. 2018 | Projekt ist beim BAV-Programm "ESöV 2050" angemeldet. |
| Juli 2018 | Projektplan zum BAV-Programm "ESöV 2050" ist eingereicht. |
| Okt. 2018 | Zusage der BAV-Finanzierung. |
| Okt. 2018 | Kickoff-Sitzung zwischen HSLU und Frey AG Stans |
| | |
| Ab Jan. 2019 | Konzeptlösung zwischen HSLU, Frey AG Stans und ABB wurde erarbeitet |
| Ab April 2019 | Der Bahnbetrieb ist eingestellt und die Sanierungsarbeiten können anfangen. |
| Ende Mai 2019 | Speichersystem ist geliefert und interne Test in Stans für die Ansteuerung des Speichersystems konnten durchgeführt werden. |
| Juni 2019 | Speichersystem ist vor Ort und mit der Anlage verkabelt. |
| Ab Juli 2019 | Inbetriebsetzung des Speichersystems mit der Bahnanlage. |
| 31. Aug. 2019 | Die sanierte Bahn ist mit dem Speichersystem wieder im Betrieb. Die Bremsenergie kann gespeichert und für die nächste Fahrt eingesetzt werden. |
| | |
| Ab Sept. 2020 | Aufgrund der Covid-Pandemie wurde der Einbau der PV-Anlage von Frühling 2020 auf September 2020 verschoben. Die erzeugte Energie der PV-Anlage kann direkt von der Bahnanlage verwendet oder zwischengespeichert werden. |
| 24. Sept. 2020 | Ein Mediananlass wurde vom BAV mit Unterstützung vom VB/TPB organisiert. |

4-2 ENERGIESCHÄTZUNG VON 2017

Um die Energiezahlen vor dem Umbau mit der im Jahr 2019 sanierten Bahn und ihrem Speichersystem vergleichen zu können, müssen zuerst die Verbrauchszahlen [3] vom Jahr 2017 aufgezeigt werden.

Zwei unterschiedliche Fälle (Sommer und Winter) des durchschnittlichen Tagesverbrauchs wurden untersucht und in einer Tabelle dargestellt. Da nur die Antriebsleistung gemessen wurde, sind die anderen Werte geschätzt.

Im Fall der Bezugsenergie muss man die folgenden Verbraucher betrachten:

Bezüger / Verbraucher	Bemerkung	Energie	Anteil Sommer	Anteil Winter
		kWh / Tag	%	%
Antrieb	Gemäss Messung	+ 333	74.5	63.4
Hilfsbetriebe und Seilbahnsteuerung	5.0 kW, geschätzt 0.8 kW, geschätzt	+ 75	16.9	14.4
Batterieladung Fahrzeug Kompressor	1.6 kW, geschätzt 4.0 kW, geschätzt	+ 28	6.3	5.3
Heizung	6.0 kW nur im Winter	+ 78	-	14.9
Messfehler		+ 10	2.4	2.0
Bezugsenergie (Sommer)		+ 446	100.0	-
Bezugsenergie (Winter)		+ 524	-	100.0

Tabelle 4: Bezugsenergie im Jahr 2017

Bei der Rückspeisung fliesst die Energie nicht nur ins Netz, sondern versorgt ebenfalls die Hilfsbetriebe mit Energie. Hier werden die Zahlen tabellarisch veranschaulicht:

Erzeuger / Selbstverbraucher	Bemerkung	Energie	Anteil
		kWh / Tag	%
Rückspeiseenergie ab Antrieb	Gemäss Messung	-106.5	-100.0
Eigenverbrauch (Hilfsbetriebe und Steuerung)	5.0 kW, geschätzt 0.8 kW, geschätzt	+17.6	+16.5
Messfehler / Hochrechnung		+1.2	+1.1
Rückspeiseenergie ins Netz		-87.8	-82.4

Tabelle 5: Rückspeiseenergie im Jahr 2017

Ein Anteil (ca.18%) der rekuperierten Bremsenergie wird selbst in der Seilbahnanlage verbraucht.

☞ Die Messungen, die im Juli 2017 durchgeführt wurden, können für die Auslegung benutzt werden. Circa 20% der Rückspeiseenergie kann bereits in der Anlage selbst verbraucht werden.

Die Bezugsenergie für den Antrieb entspricht ca. 70% der gesamten Bezugsenergie der Anlage.

4-3 HILFSBETRIEBE UND FAHRZEUGLADUNG

Seit dem 31. August 2019 fährt die sanierte Bahn "Biel-Magglingen" und die Energieflüsse werden gemessen. In der nachfolgenden Grafik werden die Energie für die Hilfsbetriebe (Steuerung der Bahn, Hydraulikölpumpe, Lüfter des Hauptmotors) sowie die Energie für die Fahrzeugladung (Bordbatterie für die Beleuchtung, Lüfter und Steuerung der Wagen und Heizung der Wagen im Winter) graphisch veranschaulicht.

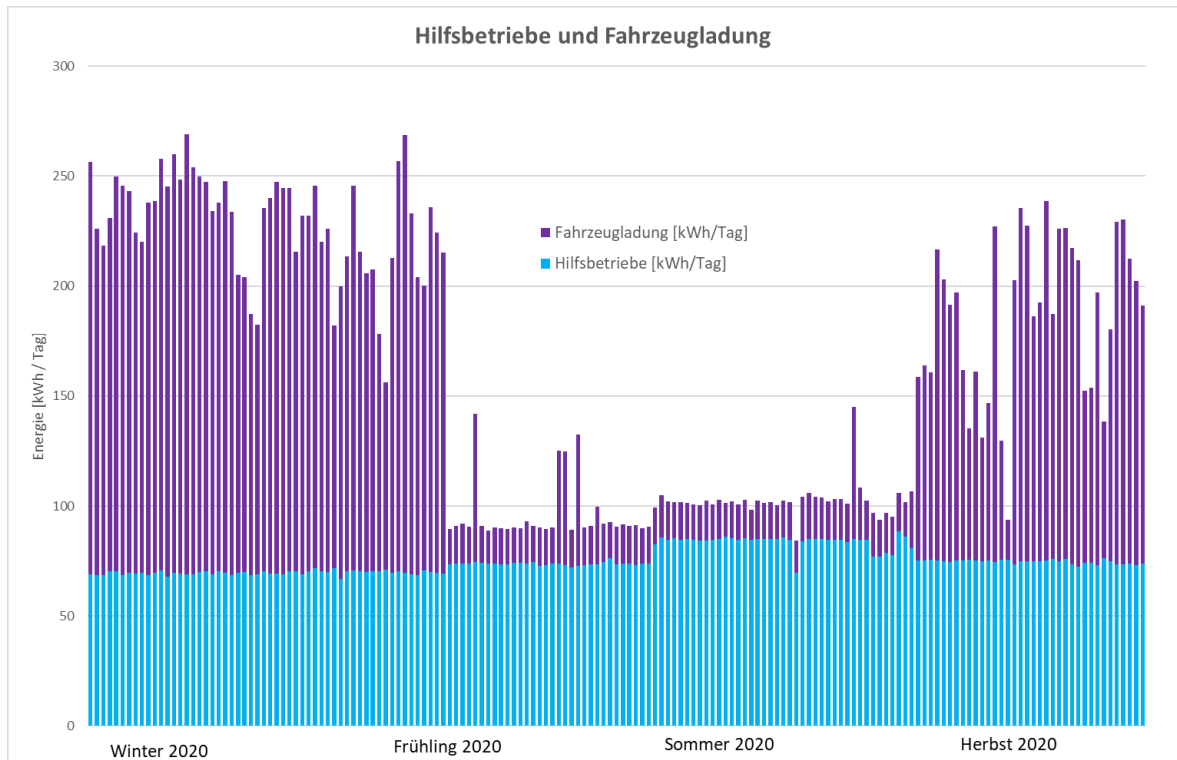


Abbildung 36: Tagesenergie: Hilfsbetriebe und Fahrzeugladung

Im Verlauf des Jahres 2020 lag die tägliche Energie für die Hilfsbetriebe bei ca. 75 kWh. Im Sommer erhöhte sich dieser Wert (→ ca. +10 kWh / Tag), da der Lüfter des Hauptmotors mehr laufen musste.

Der Winter 2020 war nicht besonders kalt, aber die tägliche Heizenergie betrug trotzdem 200 kWh. In der Zwischenzeit wurden der Thermostat und die Heizkörper besser eingestellt. Im Sommer lag die Energie für die Fahrzeugladung im Bereich von ca. 15 kWh / Tag. Dies erklärt, den Unterschied der Stromkosten vom Q1/Q4 zum Q2/Q3.

4-4 "REKUPERIERTE" BREMSENERGIE

Seit dem 31. August 2019 fährt die sanierte Bahn "Biel-Magglingen" neu mit dem Speichersystem. Da die Messdaten ständig gespeichert wurden, konnten einige neue Erkenntnisse gewonnen werden. Ab Mitte September 2020 wurde die PV-Anlage in der Bahnsteuerung voll integriert.

In der folgenden Grafik werden die tägliche motorische Antriebsenergie ("+" → Bezug) sowie die generatorische Antriebsenergie ("- " → Erzeugung) dargestellt. Zudem wird die rückgelieferte Energie und der Eigenverbrauchsgrad der "rekuperierten" Bremsenergie graphisch dargestellt.

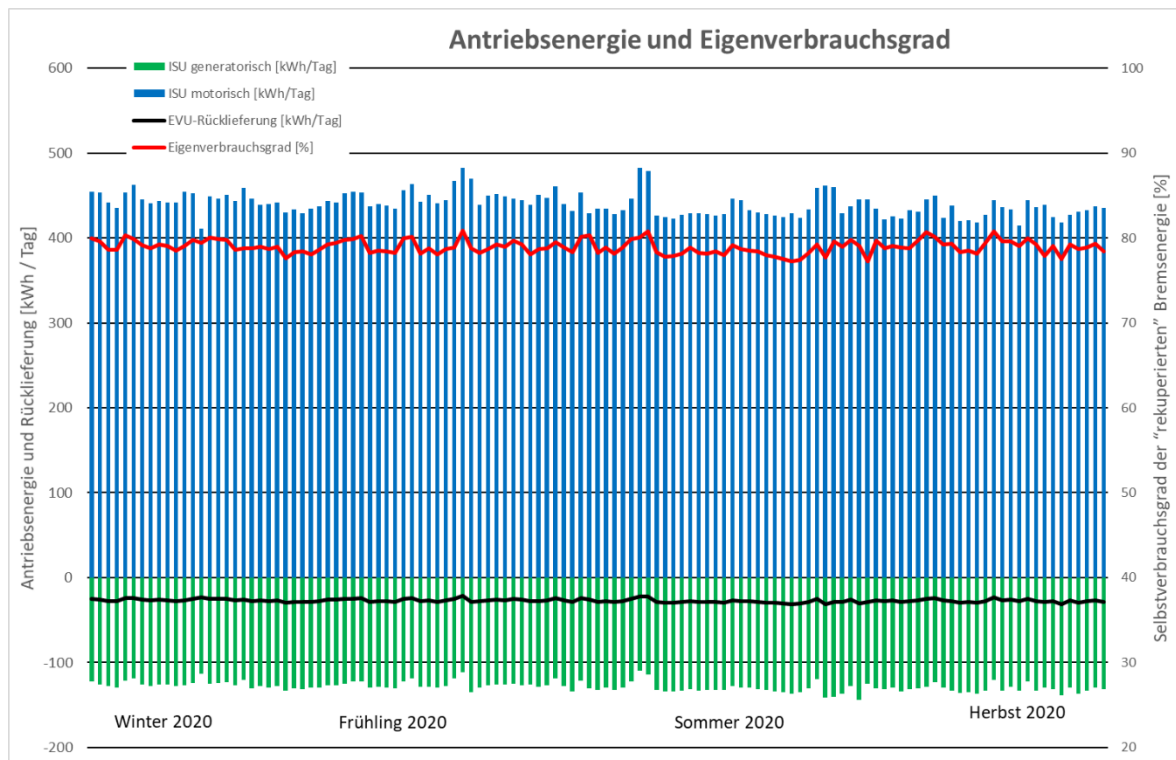


Abbildung 37: Tagesenergie: Antriebsenergie und Eigenverbrauchsgrad

Jeden Tag verbraucht der Antrieb ca. 440 kWh (→ blaue Säule) und speist ca. 128 kWh zurück (→ grüne Säule). Der durchschnittliche Rekuperationsgrad liegt bei 29%. Dank des Speichersystems wird nur ca. 27 kWh ins Netz (→ schwarze Linie) rückgeliefert. Dies ergibt einen durchschnittlichen Eigenverbrauchsgrad von 79% (→ rote Linie mit Y-Achse rechts).

Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass der Bahnbetreiber die Bezugsenergie um ca. 101 kWh pro Tag reduzieren kann.

☞ Der Eigenverbrauchsgrad liegt bei 79%. Dies bedeutet auch, dass nur 21% der Bremsenergie rückgeliefert werden muss. Im Jahr 2017 lag der Anteil der rückgelieferten Bremsenergie noch bei 82%.

Nachfolgend wird der Energiefluss für verschiedene Fälle graphisch dargestellt.

Zuerst wird der Fall eines durchschnittlichen Tages im Winter betrachtet.

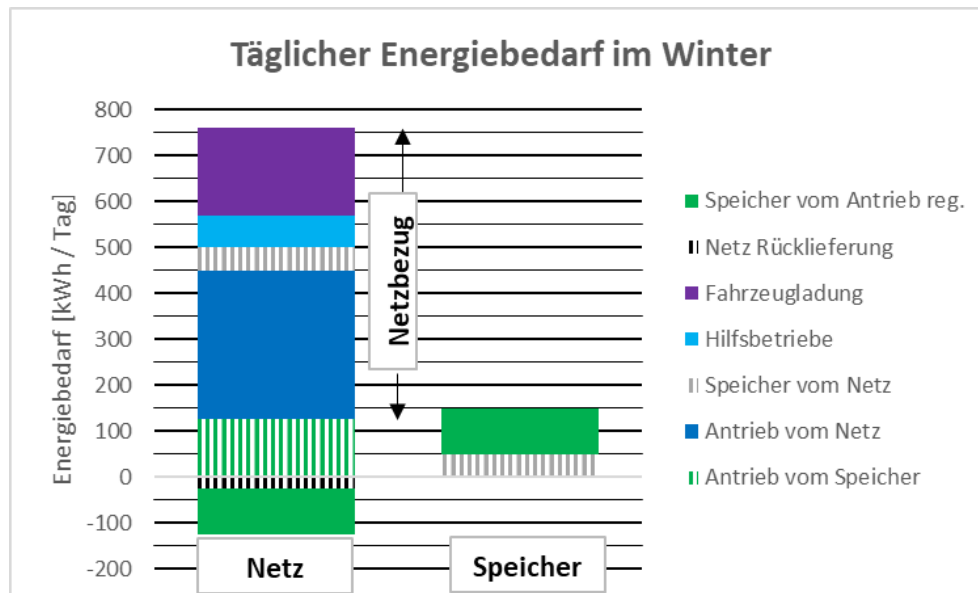


Abbildung 38: Täglicher Energiebedarf im Winter

Bei der linken Säule "Netz" gibt es einen negativen Anteil. Dieser entspricht der generatorischen Energie (-125 kWh) des Antriebs. Dieser Anteil verteilt sich auf die Netzzurücklieferung (→ schwarzes senkrechtes Muster, - 26 kWh oder 20.6%) und auf die "rekuperierte" Bremsenergie (→ grüne Säule, - 99 kWh oder 79.4%).

Anhand der rechten Säule sieht man, wie sich die Ladung des Speichers zusammensetzt. Einerseits wird dieser von der "rekuperierten" Bremsenergie (→ grüne Säule, 99 kWh oder 66.5%) aufgeladen. Andererseits wird er vom Netz in der Nacht mit "Niedertarif" (→ graue Säule mit Muster, 50 kWh oder 33.5%) voll aufgeladen.

Während des Tages kann der Speicher den Antrieb unterstützen. Dieser Anteil (→ grüne Säule mit Muster, 125 kWh) ist in der linken Säule "Netz" dargestellt. Dieser Anteil entspricht 27.8% der Antriebsenergie. Die anderen 72.2% werden vom Netz bezogen.

Das Netz speist täglich insgesamt 635 kWh für die folgenden Verbraucher ein:

- Antrieb → dunkelblaue Säule, 325 kWh oder 51.2%
- Speicher in der Nacht → graue Säule mit Muster, 50 kWh oder 7.8%
- Hilfsbetriebe → hellblaue Säule, 69 kWh oder 11%
- Fahrzeugladung (Heizung) → violette Säule, 191 kWh oder 30%

☞ Dank dem Speicher können im Winter täglich ca. 99 kWh von der "rekuperierten" Bremsenergie selbst verbraucht werden. Diese Energie braucht nicht mehr vom Netz bezogen zu werden und entspricht ca. 28% der gesamten Antriebsenergie. Der Eigenverbrauchsgrad der "rekuperierten" Bremsenergie liegt bei 79%.

Als zweites wird der Fall eines durchschnittlichen Tages im Sommer betrachtet.

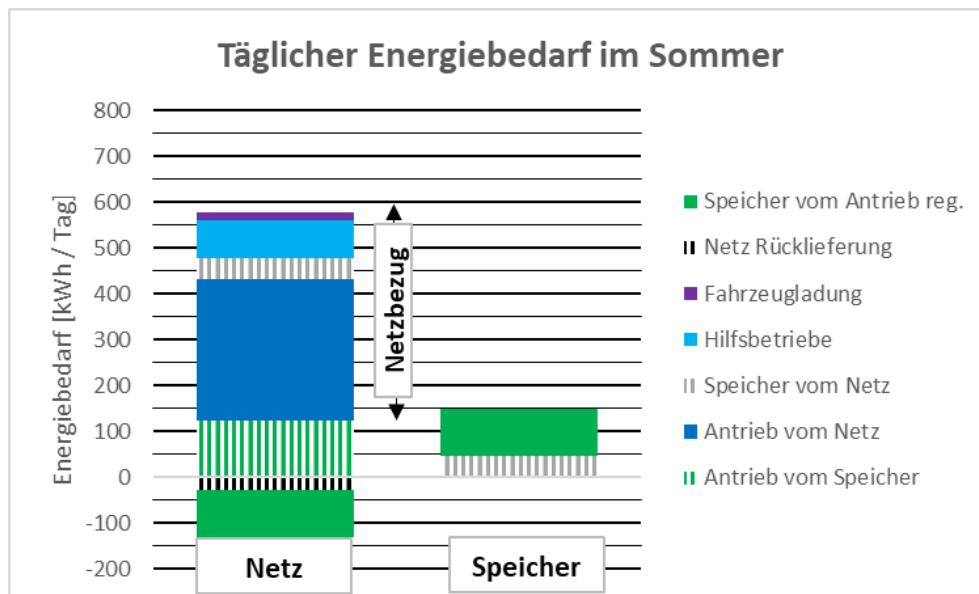


Abbildung 39: Täglicher Energiebedarf im Sommer

Bei der linken Säule "Netz" gibt es einen negativen Anteil. Dieser entspricht der generatorischen Energie (-131 kWh) des Antriebs. Dieser Anteil verteilt sich auf die Netzurücklieferung (→ schwarzes senkrechtes Muster, - 27 kWh oder 20.6%) und auf die "rekuperierte" Bremsenergie (→ grüne Säule, - 104 kWh oder 79.4%).

Anhand der rechten Säule sieht man, wie sich die Ladung des Speichers zusammensetzt. Einerseits wird er durch die "rekuperierte" Bremsenergie (→ grüne Säule, 104 kWh oder 69.8%) aufgeladen. Andererseits wird er vom Netz in der Nacht mit "Niedertarif" (→ graue Säule mit Muster, 45 kWh oder 30.2%) voll aufgeladen.

Während des Tages kann der Speicher den Antrieb unterstützen. Dieser Anteil (→ grüne Säule mit Muster, 124 kWh) ist in der linken Säule "Netz" dargestellt. Dieser Anteil entspricht 28.6% der Antriebsenergie. Die anderen 71.4% werden vom Netz bezogen.

Das Netz speist täglich insgesamt 455 kWh für die folgenden Verbraucher ein:

- Antrieb → dunkelblaue Säule, 308 kWh oder 67.8%
- Speicher in der Nacht → graue Säule mit Muster, 45 kWh oder 9.9%
- Hilfsbetriebe → hellblaue Säule, 85 kWh oder 18.7%
- Fahrzeugladung (Heizung) → violette Säule, 17 kWh oder 3.6%

👉 Fazit

Dank dem Speicher kann im Sommer täglich ca. 104 kWh von der "rekuperierten" Bremsenergie selbst verbraucht werden. Diese Energie braucht nicht mehr vom Netz bezogen zu werden und entspricht ca. 29% der gesamten Antriebsenergie. Der Eigenverbrauchsgrad der "rekuperierten" Bremsenergie liegt bei 79%.

Mit der Sanierung der Bahn im Frühling – Sommer 2019 wurden einige Parameter, welche den Energiefluss beeinflussen, geändert. Die sind nachfolgend aufgelistet:

- Fahrgeschwindigkeit 6.0 m/s anstatt 4.2 m/s (→ + 43%)
- Spezifisches Gewicht des Zugseils von 5.3 kg/m auf 5.61 kg/m (→ + 6%)
- Leergewicht der Wagen von 13'790 kg auf 14'130 kg (→ + 2%)
- Heizleistung pro Wagen von 6.0 kW auf 13.8 kW (→ + 130%)
- Lüfter des Hauptmotors wurde neu temperaturgesteuert

Nachfolgend können die Energiezahlen von 2017 mit den Energiezahlen von 2020 (→ ohne Speicher) verglichen werden.

Bezüger / Verbraucher	Energie 2017	Anteil Sommer	Anteil Winter	Energie 2020	Anteil Sommer	Anteil Winter
	kWh / Tag	%	%	kWh / Tag	%	%
Antrieb	+ 333	74.5	63.4	+ 445	82.4	61.4
Hilfsbetriebe und Seilbahnsteuerung	+ 75	16.9	14.4	+ 80	14.8	11.0
Batterieladung Fahrzeug Kompressor	+ 28	6.3	5.3	+ 15	2.8	2.1
Heizung	+78	-	14.9	+185	-	25.5
Messfehler	+10	2.4	2.0		-	-
Bezugsenergie (Som- mer)	+ 446	100.0	100.0	+ 540 (+21%)	100.0	-
Bezugsenergie (Winter)	524			+ 725 (+38%)	-	100.0

Tabelle 6: Bezugsenergie (ohne Speicher) im Jahr 2020

Dank des Speichersystems lässt sich der Netzbezug in den folgenden Fällen so reduzieren:

- Sommer: Von 540 kWh / Tag auf 455 kWh/Tag → - 85 kWh/Tag oder -16%
- Winter: Von 725 kWh / Tag auf 635 kWh/Tag → - 90 kWh/Tag oder -14%

Bei der Rückspeisung ohne Speichersystem fliesst die Energie nicht nur ins Netz, sondern versorgt ebenfalls die Hilfsbetriebe mit Energie. Hier werden die Zahlen tabellarisch veranschaulicht:

Erzeuger / Selbstverbraucher	Energie 2017	Anteil	Energie 2020	Anteil
	kWh / Tag	%	kWh / Tag	%
Rückspeiseenergie ab An- trieb	-106.5	-100.0	-128	-100.0
Eigenverbrauch (Hilfsbe- triebe und Steuerung)	+17.6	+16.5	+13	+10.2
Messfehler / Hochrechnung	+1.2	+1.1	-	-
Rückspeiseenergie ins Netz	-87.8	-82.4	-115 (+ 31%)	-89.8

Tabelle 7: Rückspeiseenergie (ohne Speicher) im Jahr 2020

- Dank des Speichersystems lässt sich die Netzzrücklieferung in diesen Fällen wie folgt reduzieren:
- Von 115 kWh / Tag auf 26 kWh/Tag → - 90 kWh/Tag oder -78%

☞ Ein Speichersystem allein kann im Durchschnitt auf dieser Anlage ca. 15 % der Bezugsenergie sowie ca. 78% der Netzzrücklieferungsenergie verringern. Dies entspricht täglich ca. 90 kWh.

4-5 PV-ANLAGE

Seit dem 18. September 2020 ist die PV-Anlage in der Seilbahnsteuerung integriert. Dies bedeutet, dass die erzeugte erneuerbare Energie direkt im Antrieb und für die Fahrzeugladung bzw. die Hilfsbetriebe verbraucht werden kann.

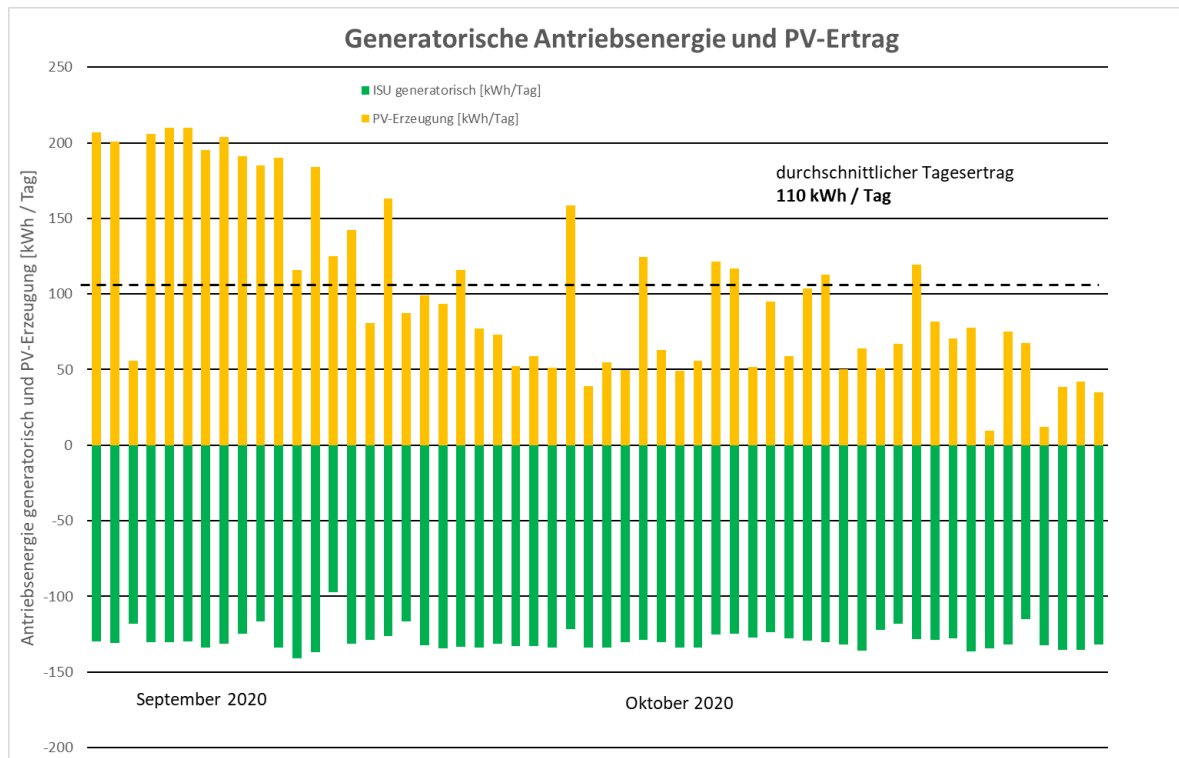


Abbildung 40: Tagesenergie: Antriebsenergie und PV-Ertrag

Gemäss dem Lieferanten der PV-Anlage liegt der potenzielle Jahresertrag bei 40'360 kWh / Jahr. Siehe auch Abschnitt 3-5 und Abbildung 32. Dies entspricht einer durchschnittlichen Erzeugung von 110 kWh pro Tag. Dies entspricht ca. 25% der Antriebsenergie (→ 440 kWh / Tag).

Jeden Tag speist der Antrieb ca. 128 kWh zurück (→ grüne Säule). Im Durchschnitt erzeugt die PV-Anlage ca. 110 kWh pro Tag (→ gelbe Säule). Damit das Diagramm übersichtlich bleibt, wurde die erzeugte Energie der PV-Anlage nicht mit dem negativen Vorzeichen¹⁷, sondern mit einem positiven Vorzeichen dargestellt.

☞ Mit der PV-Anlage kann ca. 25% der jährlichen benötigten Antriebsenergie lokal und erneuerbar gedeckt werden. Je nach Seilbahn- und PV-Anlage fliesst einen Anteil der erzeugten Energie ins Netz zurück

¹⁷ Im Energiebereich wird die Bezugsleistung normalerweise "positiv" gezählt. Im Gegensatz wird die Erzeugungsleistung "negativ" gezählt. Diese Konvention stammt aus dem Verbraucherzählpfeilsystem. Dieser Bericht verwendet, ausser expliziter Ausnahme, dieses System.

In der folgenden Grafik werden die tägliche motorische Antriebsenergie (“+” → Bezug) sowie die generatorische Antriebsenergie (“-” → Erzeugung) und die PV-Erzeugung (“-” → Erzeugung) dargestellt. Zudem wird die rückgelieferte Energie und der Eigenverbrauchsgrad der “rekuperierten” Bremsenergie kombiniert mit der PV-Erzeugung graphisch dargestellt. Ausserdem wird auch die Eigenverbrauchsenergie dargestellt.

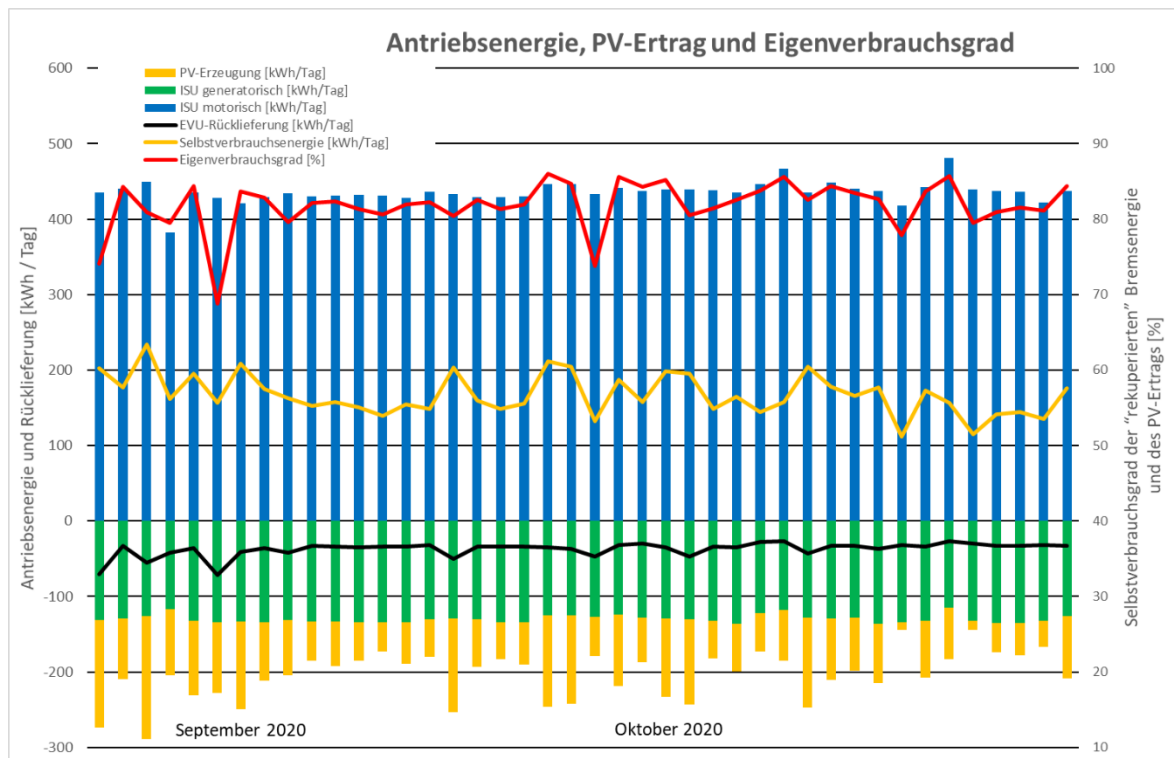


Abbildung 41: Tagesenergie: Antriebsenergie, PV-Ertrag und Eigenverbrauchsgrad

Jeden Tag verbraucht der Antrieb ca. 436 kWh (→ blaue Säule) und speist ca. 130 kWh (→ grüne Säule) zurück. Der durchschnittliche Rekuperationsgrad liegt bei 30%. Zudem liegt der durchschnittliche Ertrag der PV-Anlage bei 75 kWh (→ gelbe Säule) im Herbst 2020.

Dank des Speichersystems wird nur ca. -37 kWh ins Netz (→ schwarze Linie) rückgeliefert. Dies ergibt einen durchschnittlichen Eigenverbrauchsgrad von 82% (→ rote Linie mit Y-Achse rechts).

Die selbst verbrauchte Energie (→ gelbe Linie) der PV-Anlage und der “rekuperierten” Bremsenergie liegt bei 167 kWh / Tag.

Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass der Bahnbetreiber die Bezugsenergie im Herbst 2020 um ca. 167 kWh pro Tag reduzieren konnte.

☞ Dank dem Speicher und der PV-Anlage kann im Herbst 2020 täglich ca. 167 kWh von der “rekuperierten” Bremsenergie und von der PV-Anlage selbst verbraucht werden. Diese Energie braucht nicht mehr vom Netz bezogen zu werden und entspricht ca. 38% der Antriebsenergie.

Der Eigenverbrauchsgrad der “rekuperierten” Bremsenergie und der PV-Anlage liegt bei 82%. Dies bedeutet auch, dass nur 18% der Bremsenergie rückgeliefert werden muss. Im Jahr 2017 lag dieser Wert bei 82%.

Nachfolgend wird der Energiefluss für einen durchschnittlichen Tag graphisch dargestellt. In diesem Fall werden einige Tage Mitte Oktober mit einem PV-Ertrag von 110 kWh/Tag betrachtet:

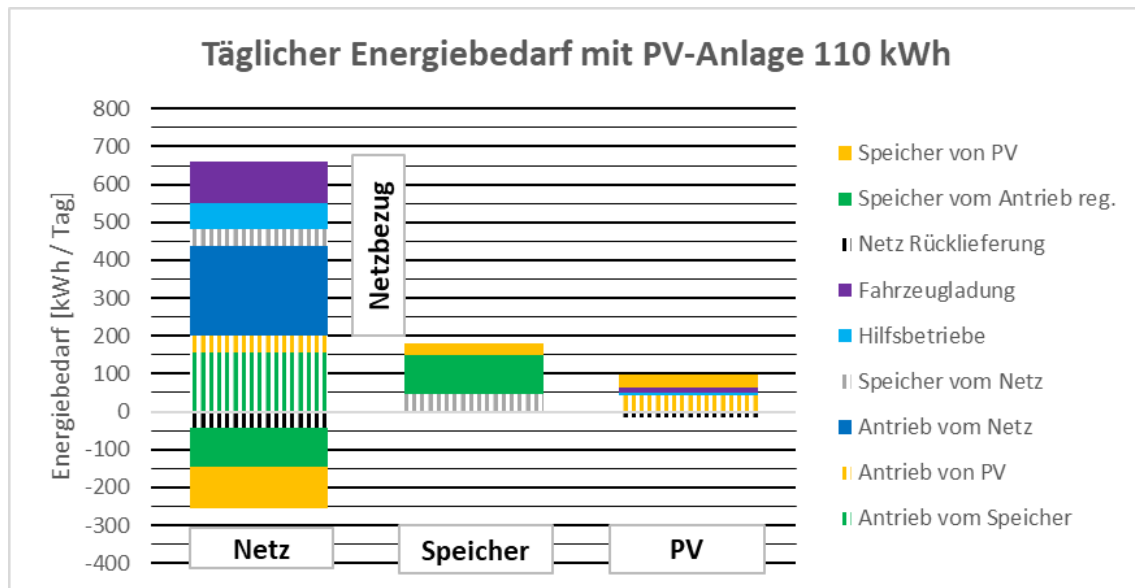


Abbildung 42: Täglicher Energiebedarf mit der PV-Anlage

Bei der linken Säule "Netz" gibt es einen negativen Anteil. Dieser entspricht der generatorischen Energie (-129 kWh) des Antriebs und der PV-Ertrag (-112 kWh).

Dieser Anteil verteilt sich auf die Netzurücklieferung (→ schwarzes senkrechtes Muster, - 41 kWh oder 17%) und auf die "reduzierte" Bremsenergie (→ grüne Säule, - 103 kWh oder 43%) und auf die selbst nutzbare Energie der PV-Anlage (→ gelbe Säule, - 97 kWh oder 40%)

Bei der mittleren Säule "Speicher" sieht man, wie die Ladung des Speichers zusammengesetzt wird. Einerseits wird er von der "reduzierten" Bremsenergie (→ grüne Säule, 103 kWh oder 57%) und von der PV-Anlage (→ gelbe Säule, 33 kWh oder 18%) aufgeladen. Andererseits wird er vom Netz in der Nacht mit "Niedertarif" (→ graue Säule mit Muster, 45 kWh oder 25%) voll aufgeladen.

Auf der rechten, mit «PV» bezeichneten Seite, sieht man, wie die erzeugte Energie der PV-Anlage (112 kWh) verwendet wird. Einerseits wird sie "direkt" (64 kWh oder 57%) für den Antrieb (→ gelbe Säule mit Muster), für die Hilfsbetriebe (→ hellblaue Säule) bzw. für die Fahrzeugladung (→ violette Säule) verwendet oder im Speichersystem zwischengespeichert (→ gelbe Säule, 33 kWh oder 30%). Andererseits wird sie ins Netz (→ schwarze Säule mit Muster, 15 kWh oder 13%) zurückgeliefert.

Während dem Tag kann der Speicher den Antrieb unterstützen. Dieser Anteil (→ grüne Säule mit Muster, 156 kWh) ist in der linken Säule "Netz" dargestellt. Zudem wird die PV-Anlage den Antrieb direkt unterstützen (→ gelbe Säule mit Muster, 44 kWh). Diese beiden Anteile entsprechen 46% der Antriebsenergie. Die anderen 54% werden vom Netz (238 kWh) bezogen.

Das Netz bezieht täglich insgesamt 462 kWh für die folgenden Verbraucher:

- Antrieb → dunkelblaue Säule, 238 kWh oder 51.5%
- Speicher in der Nacht → graue Säule mit Muster, 45 kWh oder 9.8%
- Hilfsbetriebe → hellblaue Säule, 67 kWh oder 14.5%
- Fahrzeugladung (Heizung) → violette Säule, 112 kWh oder 24.2%

☞ Dank dem Speicher und der PV-Anlage kann im Durchschnitt täglich ca. 220 kWh von der "reduzierten" Bremsenergie und von der PV-Anlage selbst genutzt werden. Diese Energie braucht nicht mehr vom Netz bezogen zu werden und entspricht ca. 32% des gesamten Energiebedarfs. Der Eigenverbrauchsgrad der "reduzierten" Bremsenergie und der PV-Anlage liegt bei 83%.

Im nachfolgenden Diagramm wird der Energiefluss eines durchschnittlichen Tages genauer untersucht.

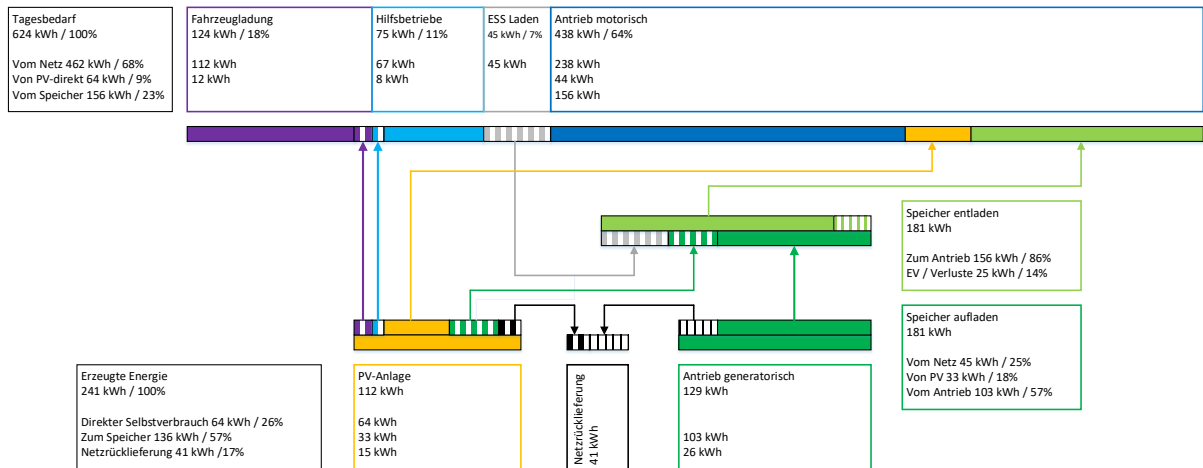


Abbildung 43: Gesamter Energiefluss

Unten links sieht man, wie die erzeugte erneuerbare Energie der PV-Anlage (112 kWh) verwendet wird. Die Nutzung erfolgt erstens:

- "direkt" für die Fahrzeugladung → violette Säule, 12 kWh oder 11%
- "direkt" für die Hilfsbetriebe → hellblaue Säule, 8 kWh oder 7%
- direkt" für den Antrieb → gelbe Säule, 44 kWh oder 39%

Dieser "direkte" Anteil entspricht 64 kWh oder 57% der erzeugten erneuerbaren Energie der PV-Anlage.

Zweitens wird sie:

- "indirekt" zwischengespeichert → grüne Säule mit Muster, 33 kWh oder 30%

Drittens wird sie:

- ins Netz zurückgeliefert → schwarze Säule mit Muster, 15 kWh oder 13%

Unten rechts sieht man, wie die generatorische Energie (129 kWh) des Antriebs verwendet wird. Einerseits wird sie:

- ins Netz zurückgeliefert → schwarze Säule mit Muster, 26 kWh oder 20%

Andererseits wird sie:

- "indirekt" zwischengespeichert → grüne Säule, 103 kWh oder 80%

In der Mitte rechts sieht man den Energiefluss (181 kWh) des Speichers.

Zum einen wird das Speichersystem aufgeladen:

- Vom Netz in der Nacht → graue Säule mit Muster, 45 kWh oder 25%
- Von der PV-Anlage → grüne Säule mit Muster, 33 kWh oder 18%
- Vom Antrieb → grüne Säule, 103 kWh oder 57%

Zum anderen wird das Speichersystem entladen:

- Für den Antrieb → hellgrüne Säule, 156 kWh oder 86%
- Durch Verluste und Eigenverbrauch → hellgrüne Säule mit Muster, 25 kWh oder 14%
-

Oben sieht man die Aufteilung des Energiebedarfs (624 kWh). Folgende Verbraucher beziehen Energie vom Netz oder von der PV-Anlage oder vom Speicher:

- Fahrzeugladung (Heizung) → violette Säule, 124 kWh oder 18%
- Hilfsbetriebe → hellblaue Säule, 75 kWh oder 11%
- Speicher in der Nacht → graue Säule mit Muster, 45 kWh oder 7%
- Antrieb → dunkelblaue Säule, 438 kWh oder 64%

☞ Die Energie der PV-Anlage kann teilweise die Verbraucher "direkt" (64 kWh) versorgen. Dank der Kombination mit dem Speicher kann auch die "rekuperierte" Bremsenergie vom Antrieb wiederverwendet werden. Dieser Anteil liegt bei 156 kWh. Diese Energie (220 kWh) entspricht ca. 32% des gesamten Energiebedarfs. Die Antriebsenergie (438 kWh) kann bei 46% von PV-Anlage und vom Speicher (200 kWh) gedeckt werden.

4-6 NOTANTRIEB

Wie im Abschnitt 2-4 erwähnt muss diese Anlage mit einem Notantrieb ausgerüstet werden. Im Falle eines Stromausfalls dient das Speichersystem als unabhängige Energiequelle. Der Umrichter, welcher von den Batterien eingespeist ist, arbeitet nicht mehr im Parallel mit dem Netz (→ Netzbetrieb), sondern selbstständig. Das ist der sogenannte "Inselbetrieb". Dies bedeutet, dass die Umrichter die Spannung (→ 3 x 230/400V) und die Frequenz (→ 50 Hz) aufbauen können. Ausserdem muss die Spannungsqualität (→ Oberwelleninhalt) die Normen erfüllen.

Leider können die gelieferten Umrichter (→ 2 x 30 kVA) noch nicht alle Anforderungen erfüllen. Diverse Anpassungen (→ Firmware Update) sind im Frühling 2022 vorgesehen. Aus diesem Grund steht momentan ein Notstromaggregat (→ Dieselgenerator) neben der Antriebsstation. Es dient als unabhängige Energiequelle.

4-7 WIRTSCHAFTLICHKEIT

Die nachfolgenden Zahlen zeigen eine Grössenordnung, damit die Wirtschaftlichkeit der vorgeschlagenen Lösung betrachtet werden kann.

Als Investition fallen folgende Posten an:

- PV-Anlage (Material, Planung, Bewilligung)
- Batteriespeicher mit Integration
- Ersatz der Batterien nach 10 Jahren
- Umrichter mit der Steuerung
- Engineering und Montage (Planung, EMS-Steuerung, Integration in der Seilbahnsteuerung)

Beim Bau einer PV-Anlage kann Unterstützung beantragt werden. Diese fördert den Ausbau der erneuerbaren Energiequelle (PV, Wind, Biomasse und kleine Wasserkraft) in der Schweiz und gehört zur "Energiestrategie 2050" des Bundes.

Zum Ertrag zählt einerseits die erneuerbar erzeugte Energie der PV-Anlage, andererseits kommt die "re-kuperierte" Bremsenergie hinzu. Diese beiden Anteile ermöglichen eine Reduktion des Netzbezuges. Dieser Strombedarf (→ 200 kWh/Tag gemäss Abschnitt 5-2) muss nicht vom EVU beschafft werden.

Als Grundlagen für die Berechnung wurden 360 Betriebstage pro Jahr und eine Lebensdauer von 20 Jahren angenommen.

Untenstehend werden die Investitionskosten tabellarisch aufgelistet:

Posten	Annahmen und Bemerkungen	Kosten kCHF	Anteil %
PV-Anlage Material, Montage Planung und IBS	2'100 CHF/kWp und 42 kWp Standardanlage (2018): 1'400 CHF/kWp Koeffizient: x 1.5 für Flachdächer	(88.2)	-
Unterstützung (09/2020) Einmalvergütung (KLEIV)	Grundbetrag: 1'000 CHF Leistungsbetrag: 330 CHF/kWp Leistung: 42 kWp	(-14.8)	-
PV-Anlage mit KLEIV		73.4	28
Batteriespeicher	NMC: 600 €/kWh Kurs: 1€ ↔ 1.10 CHF Energie: 68 kWh	44.9	17
Integration Batterie BMS	ca. 50% vom Batteriepreis	22.4	8
Umrichter	Antriebsumrichter ¹⁸ : 200 CHF/kW Koeffizient: x 1.25 für Netzumrichter Leistung: 2 x 30 kW	18.0	7
Umschaltfeld EMS-Steuerung	Planung, Engineering, Material, Integra- tion Energiemanagementsteuerung (→ EMS)	60.0	23
Ersatz der Batterien nach 10 Jahren	NMC: 600 €/kWh Kurs: 1€ ↔ 1.10 CHF 68 kWh	44.9	17
Investition kCHF	Gesamtinvestition ohne Unterhalt	263.6	100

Tabelle 8: Investitionskosten

Untenstehend werden die Erträge tabellarisch dargestellt:

Posten	Annahmen und Bemerkungen	Ertrag	Einheit
Tagesertrag	220 kWh / Tag Energiepreis ¹⁹ : 18 Rp. / kWh	39.6	CHF /Tag
Jahresertrag	360 Betriebstage pro Jahr	14.3	kCHF /Jahr
Gesamtertrag	über die Lebensdauer: 20 Jahre	285.1	kCHF

Tabelle 9: Ertrag

☞ Die einfachen Berechnungen (ohne Verzinsung des Kapitals und ohne Unterhalt) zeigen, dass die Investitionskosten nach ca. 18 Jahren amortisiert sind. Natürlich hängen diese Zahlen von vielen Faktoren ab und müssen je nach Anlage verfeinert werden.

¹⁸ http://www.topmotors.ch/sites/default/files/2018-08/D_MB_11_FU_Preise.pdf

¹⁹ Durchschnittlicher Preis (2020) der Verbrauchskategorie C3 (150'000 kWh/Jahr) gemäss <https://www.strompreis.elcom.admin.ch/Map/ShowSwissMap.aspx>

5. Diskussion

5-1 "REKUPERIERTE" ENERGIE

Im Abschnitt 4-4, wurde der Eigenverbrauchsgrad der "rekuperierten" Bremsenergie anhand der Energiemessungen berechnet. Einerseits liegt der Rekuperationsgrad bei 29%, andererseits kann die "rekuperierte" Bremsenergie zu 79% selbst verbraucht werden. Dies bedeutet, dass durch das Speichersystem ca. 23% der Antriebsenergie wiederverwendet werden kann.

Ohne Speichersystem liegt der Eigenverbrauchsgrad gemäss Zahlen von 2017 nur bei 18%. Das Speichersystem allein kann den Eigenverbrauchsgrad vervierfachen. Die wichtigen Faktoren, welche einen Einfluss auf den Rekuperationsgrad und auf den Eigenverbrauchgrad haben, sind nachfolgend aufgelistet:

- Verhältnis Neigung der Strecke zur Reibung (Kurven, Seilrollen)
- Verhältnis Zugseil- zum Gegenseilgewicht
- Verhältnis Zugseilgewicht zum Wagengewicht
- Verhältnis Ladeleistung zur generatorischen Antriebsleistung
- Verhältnis Entladeleistung zur motorischen Antriebsleistung

Das umgesetzte Speichersystem, nur von der "rekuperierten" Bremsenergie her betrachtet, macht nur Sinn bei folgenden Anlagentypen:

- Antriebstation muss sich im Berg befinden, da sonst Zugseil und Gegenseilgewicht gleich sind.
- Windenbahn oder 1-Kabinen-Pendelbahn mit nur einem Fahrzeug.

Im Anhang Abschnitte 2.3.2 bzw. 3.3.2, wird die Wirkung eines Gegenseils ausführlich erklärt.

Leider macht das vorgeschlagene Speichersystem keinen grossen Sinn bei diesen Anlagentypen:

- Flachbahnen wie "Airport Shuttle" sind nicht geeignet, da die Neigung null ist.
- Fangbremslose Pendelbahnen sind mit einem gespleissten Seil angetrieben. In diesem Fall wiegen das Zugseil und das Gegenseil gleichviel.

5-2 PV-ANLAGE

Im Abschnitt 4-5 wurde der Eigenverbrauchsgrad der "rekuperierten" Bremsenergie und der PV-Anlage anhand der Energiemessungen berechnet. Dieser Anteil liegt an einem durchschnittlichen Tag (→ Tagesertrag von 2.6 kWh/kWp) bei 83%.

Interessant ist der "direkte" Eigenverbrauch der erneuerbaren erzeugten PV-Energie. Dieser Anteil liegt bei 57% bei dem betrachteten Fall. Nur 30% der überschüssigen Energie muss im Speicher zwischengelagert werden. Dieser hohe "direkte" Eigenverbrauch liegt bei einer günstigen Fahrzeit (→ 6 Minuten) zur Haltezeit (→ 9 Minuten).

Je nach betrieblichen Bedingungen (→ kurze Haltezeit) lohnt es sich eine PV-Anlage ohne Speicher zu bauen.

Bei dieser Anlage konnte fast die Hälfte (→ 46%) der Antriebsenergie von der PV-Anlage und vom Speicher gedeckt werden. Eine grösser dimensionierte PV-Anlage könnte diesen Anteil erhöhen, würde aber auch eine grössere Ladeleistung des Speichersystems verlangen. Wenn die Anlage stillsteht, muss der Speicher einerseits die überschüssige Leistung schlucken, andererseits muss er die Energie (→ 10 kWh bei einer Haltezeit von 10 Minuten für eine PV-Anlage von 60 kWp) zwischenspeichern.

5-3 NOTANTRIEB

Wie im Abschnitt 2-4 erwähnt kann das Speichersystem als unabhängige Energiequelle eingesetzt werden. Da immer eine Energiereserve für eine komplette Notfahrt ($\rightarrow 16.4 \text{ kWh}$, gemäss Anhang 7.2) bereitgestellt werden muss, wird der Speicher nie komplett entleert. Deshalb hat diese Notfahrtenenergie einen guten Einfluss auf die Lebensdauer des Speichersystems. Im Normalbetrieb liegt der niedrigste Ladezustand bei 24%.

Ein Speichersystem, welches für den Normalbetrieb und für den Notantrieb eingesetzt wird, verlangt eine komplexe Umschaltung zwischen den verschiedenen Energiequellen "Netz" und "Batteriespeicher".

Gegenüber einem konventionellen Notantrieb mit Notstromaggregat weist diese Speicherlösung einige Vor- und Nachteile auf.

- (+) Weniger Platzbedarf im Maschinenraum, da schon für den Normalbetrieb vorgesehen
- (-) Mehrkosten für die Umschaltung der Energiequellen
- (+) Keinen Treibstofftank im Maschinenraum
- (+) Keinen Unterhaltskosten für das Notstromaggregat bzw., für den Treibstofftank
- (+) Umweltfreundliche Lösung, da keinen fossilen Energieträger
- (-) Kosten für die Energiereserve einer Notfahrt

5-4 WIRTSCHAFTLICHKEIT

Wie im Abschnitt 4-7 erwähnt kann das gesamte System (PV-Anlage und Batteriespeicher) nach 18 Jahren amortisiert werden. Bei dieser Berechnung wurden die Minderkosten des Notstromaggregats nicht berücksichtigt.

Ausserdem kann das Speichersystem auch die Kosten der Spitzenleistung reduzieren. In diesem Fall muss die Verfügbarkeit des Speichersystems bei 100% liegen, da die Spitzenleistung nur monatlich abgerechnet ist.

Momentan liegt diese Reduzierung bei 5 kW pro Monat und das Potenzial liegt bei 20 kW pro Monat. Hier müssen ein paar Überwachungen und Funktionen im Batteriespeichersystem angepasst werden. Dies ist für den Sommer 2021 vorgesehen.

Die wichtigen Faktoren, welche einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des gesamten Energiesystems haben, sind nachfolgend aufgelistet:

- Investitionskosten der PV-Anlage (Dach, Gebäude, Zugänglichkeit, ...)
- Stromkosten von EVU zu den Investitionskosten der PV-Anlage
- Erwartete Lebensdauer oder Vollzyklen des Speichersystems
- Stromkosten von EVU zum Speicherpreis
- Verhältnis Leistung zur Energie des Speichersystems

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Nur Speichersystem

Der Antrieb von Standseilbahnen mit bergseitiger Antriebstation bezieht nicht nur Strom vom Netz, sondern speist auch ins Netz zurück. Das Verhältnis zwischen Bezugsenergie und Rückspeiseenergie oder zwischen motorischer Energie (→ Antrieb treibt die Fahrzeuge an) und generatorischer Energie (→ Antrieb bremst die Fahrzeuge) heisst Rekuperationsgrad und liegt im Bereich von 30%. Dieses hohe Verhältnis hängt nicht nur vom Lastfall, sondern auch von der Verschiebung des Zugseils während einer Fahrt ab. Also steht diese Energie bei jeder Fahrt zur Verfügung. Sie entspricht ca. 30% der Antriebsenergie und hängt von diversen Faktoren ab:

- Verhältnis Neigung der Strecke zur Reibung (Kurven, Seilrollen)
- Verhältnis Zugseil- zum Gegenseilgewicht
- Verhältnis Zugseilgewicht zum Wagengewicht

Diese "rekuperierte" Bremsenergie kann ins Netz zurückgespeist oder für die nächste Fahrt zwischen- gespeichert werden. Da die Antriebsenergie ca. 70% des gesamten Netzenergiebezugs einer Standseilbahn entspricht, ist es sehr interessant diese "rekuperierte" Bremsenergie selbst zu verbrauchen.

Dank eines optimal ausgelegten Speichersystems ist es möglich einen Eigenverbrauchsgrad bis zu ca. 80% zu erreichen. Ohne dieses Speichersystem liegt der Eigenverbrauchsgrad nur bei ca. 20%. Ebenfalls lässt sich die **Netzzrücklieferungsenergie von 20% auf bis zu 5% der gesamten Netzbezugsenergie reduzieren.**

Ausserdem können diese Überlegungen für **Pendelbahnen** (→ je nach Verhältnis Zugseil- zum Gegenseilgewicht) oder für **Windenbahnen** (→ seltener Optimalfall) angewendet werden.

Die Wirtschaftlichkeit der Lösung hängt von vielen Faktoren ab. Diese sind nachfolgend aufgelistet:

- Stromkosten vom EVU im Verhältnis zu den Investitionskosten des Speichersystems
- Erwartete Lebensdauer oder Vollzyklen des Speichersystems
- Anzahl Fahrten pro Tag bzw. pro Jahr
- Menge der "rekuperierten" Bremsenergie
- Verhältnis Leistung zur Energie des Speichersystems

Zudem kann das Speichersystem als unabhängige umweltfreundliche Energiequelle des Notantriebes dienen.

Nur PV-Anlage

Da die Antriebstationen von Pendelbahnen meistens eine grosse Dachfläche mit Neigung verfügen, macht es Sinn das Dach mit einer PV-Anlage zu bestücken. Auf Grund des aktuellen Energiegesetzes ist es finanziell attraktiv mit dieser selbst erzeugten, erneuerbare Energie die Seilbahnanlage teilweise zu versorgen.

Im Laufe dieses Projektes konnte an einem durchschnittlichen Tag (→ 2.6 kWh/kWp) **ca. 55% der erzeugten Energie selbst verbraucht** werden. Diese Energie speist "direkt" den Antrieb, die Hilfsbetriebe sowie die Fahrzeugladung. Dies bedeutet, dass 45% der selbsterzeugten Energie ins Netz zurückgespeist muss. Der Eigenverbrauchsgrad hängt von diversen Faktoren ab:

- Verhältnis PV-Leistung zur Antriebsleistung
- Neigung und Ausrichtung der PV-Anlage
- Verhältnis Fahrzeit zur Haltezeit

Ebenfalls hängt die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage von vielen Faktoren ab. Diese sind nachfolgend aufgelistet:

- Investitionskosten der PV-Anlage (Dach, Gebäude, Zugänglichkeit, ...)
- Stromkosten vom EVU im Verhältnis zu den Investitionskosten der PV-Anlage
- Anzahl Fahrten pro Tag bzw. pro Jahr

Die Umlaufbahnen (siehe Abschnitt 1-3) beziehen während der Betriebszeit eine konstante Leistung vom Netz. Hier macht es Sinn eine PV-Anlage zu bauen.

Zudem liegen die **Bergbahnanlagen meistens über der Nebelgrenze** und laufen vorwiegend während des Tages. Hier ist das Potential gross die Energie selbst zu erzeugen und direkt zu verbrauchen. Dieser Effekt wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass die Bergbahnen bei schönem Wetter am stärksten frequentiert werden. Die **selbsterzeugte erneuerbare Energie einer PV-Anlage** kann, je nach Verhältnis zu der Antriebsleistung, **bis zu 100% selbst verbraucht** werden.

Kombination PV-Anlage und Speichersystem

Um den Eigenverbrauch der selbsterzeugten, erneuerbaren Energie einer PV-Anlage zu erhöhen, ist die Kombination einer PV-Anlage mit einem Speichersystem für die Pendelbahn sehr attraktiv. Im Laufe dieses Projektes konnte an einem durchschnittlichen Tag ($\rightarrow 2.6 \text{ kWh/kWp}$) ein Eigenverbrauch von ca. 55% der erzeugten Energie gemessen werden.

Dank des Speichersystems kann zusätzlich ca. 30% der PV-Energie selbst verwendet werden. Dieser Anteil kann im Speicher zwischengespeichert und dadurch für die nächste Fahrt eingesetzt werden. Diese Kombination mit dem Speicher ermöglicht eine Reduzierung der **rückgelieferten Energie der PV-Anlage ins Netz** von 55% auf **ca. 10-15%**.

Dank der Mehrfachnutzung des Speichersystems kann auch die "rekuperierte" Bremsenergie vom Antrieb wiederverwendet werden. Die **gesamte selbst verbrauchte Energie entspricht ca. 32% des gesamten Energiebedarfs**. Die Antriebsenergie kann zu 46% von PV-Anlage und vom Speicher gedeckt werden. Der **Eigenverbrauchsgrad** der "rekuperierten" Bremsenergie und der PV-Anlage liegt insgesamt **bei 83%**.

Die Wirtschaftlichkeit der gesamten Lösung hängt von vielen Faktoren ab. Diese sind nachfolgend aufgelistet:

- Investitionskosten der PV-Anlage (Dach, Gebäude, Zugänglichkeit, ...)
- Stromkosten vom EVU im Verhältnis zu den Investitionskosten der PV-Anlage
- Erwartete Lebensdauer oder Anzahl Vollzyklen des Speichersystems
- Stromkosten vom EVU im Verhältnis zum Speicherpreis
- Verhältnis Leistung zur Energie des Speichersystems
- Anzahl Fahrten pro Tag bzw. pro Jahr

Fazit

Ja nach Anlagentyp machen die folgenden Varianten Sinn:

- **Umlaufbahnen: nur PV-Anlage** ohne Speichersystem²⁰ \rightarrow **Eigenverbrauchsgrad bis 100%**
- **Pendelbahnen: PV-Anlage mit Speichersystem** \rightarrow **Eigenverbrauchsgrad bis 85%**

²⁰ Hier macht es Sinn, wenn die Umlaufbahn auch im Sommer betrieben wird, da die PV-Anlage am höchstens im Sommer erzeugt.

7. Veröffentlichungen und Ausblick

Während der Projektzeit wurden die die Projektschritte sowie die Projektergebnisse dauernd kommuniziert. Untenstehend werden ein paar Links dargestellt:

- SCCER-Mobility, "Swiss Competence Center in Energy Research" am 06.09.2019
[SCCER Poster B1 \(sccer-mobility.ch\)](https://www.sccer-mobility.ch)
- BAV-Newsletter im Q4/2019
[Bundesamt für Verkehr BAV Energie erzeugen beim Bergabfahren \(admin.ch\)](https://www.admin.ch/bav)
- BAV Medienkonferenz am 24.09.2020
[Bundesamt für Verkehr BAV Öffentlicher Verkehr trägt dazu bei, Energie zu sparen und CO2-Ausstoss zu senken \(admin.ch\)](https://www.admin.ch/bav)

Diverse Berichte:

Zeitung: "La Liberté"

[Le funiculaire avance grâce au soleil - La Liberté \(laliberte.ch\)](https://www.laliberte.ch)

Zeitung: "Le Nouvelliste":

[Transports: dans le canton de Berne un funiculaire avance grâce au soleil \(lenouvelliste.ch\)](https://www.lenouvelliste.ch)

Radio "RJB, Radio Jura Bernois"

[Le funiculaire Bienne-Macolin, pionnier écolo - RJB votre radio régionale](https://www.rjb.ch)

Fernsehen: "RTS 12h45"

[12h45 - Le funiculaire de Bienne Macolin se distingue par sa gestion énergétique. Il est désormais autonome en énergie à 30% - Play RTS](https://www.rts.ch)

- HSLU News and Stories im Q2/2021
[Ausgezeichnet: Bremsenergie treibt Standseilbahn an \(hslu.ch\)](https://www.hslu.ch)
- Beitrag auf "Seilbahn.net" im Q2/2021
[Neuartiges Energiesystem für Seilbahnen nützt Bremsenergie](https://www.seilbahn.net)
- Beitrag in der Fachmagazin "Seilbahn International"
[Neuartiges Energiesystem für Seilbahnen nützt Bremsenergie - Seilbahnen International \(simagazin.com\)](https://www.seilbahnen-international.com)
- SBS-Forum am 19.20. Oktober 2021
[Forum SBS 2021 - GV 2021 - seilbahnen.org](https://www.seilbahnen.org)
- European Solarpreis am 2. Dezember 2021
[Die VB gewinnen den Europäischen Solarpreis - Verkehrsbetriebe Biel | Transports Publics Biennois \(vb-tpb.ch\)](https://www.vb-tpb.ch)
[Award Ceremony of the European Solar Prize 2021/22 - YouTube](https://www.youtube.com/watch?v=...)

Da dieses Projekt ein grosses Potenzial in der Seilbahnbranche aufweist, wird die beschriebene Grundidee (→ Kombination von PV-Anlage mit Speichersystem für Pendelbahnen) durch die Fima Frey AG, Stans von der Gruppe Doppelmayr-Garaventa industrialisiert. Ein paar Projekten werden zum Beispiel in einer nahen Zukunft umgesetzt:

- Standseilbahn "Sierre-Montana" voraussichtlich im Herbst 2022
[Funiculaire Sierre-Montana-Crans: le Conseil d'Etat dit oui à la rénovation \(lenouvelliste.ch\)](https://www.lenouvelliste.ch)
- Vier einspurige "Funifor-Luftseilbahnen und eine klassische Pendelbahn im Gebiet "Schilthorn"
[Projekt SCHILTHORNBahn 20XX: Effizientes Energiemanagement-Konzept geplant | Schilthornbahn AG](#)

Viele andere Projekte befinden sich aktuell (Stand: Februar 2022) in der Besprechungsphase.

8. Danksagung

Ohne die Unterstützung vom BAV-Programm "ESöV 2050" wäre dieses Projekt nicht zustande gekommen. An dieser Stelle möchten wir der Begleitgruppe (T. Chevroulet, D. Schaller und J.-L. Robineau) danken.

Ebenfalls bedanken wir uns bei dem Umsetzungspartner Frey AG, Stans (A. Beffa, H. Zeller und A. Tabord) und dem Bahnbetreiber (R. Schlup, R. Beek und dem gesamten Team) für das Vertrauen und die gute Zusammenarbeit.

Ebenso möchte ich den Arbeitskollegen (Prof. T. Prud'homme, Prof. A. Omlin und G. Vonwyl) für die Begleitung dieses Projektes danken.

9. Verzeichnisse

8-1 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Begriff
BAV	Bundesamt für Verkehr
BMS	Gerät, welches die Batteriezellen überwacht → Englischer Begriff: „Battery Management System“
DoD	Entladezustand des Speichers in Prozent → englischer Begriff: „Depth of discharge“
EMS	Energiemanagementsteuerung
ESS	Energiespeichersystem → Englischer Begriff: „Energy Storage System“
EVU	Elektrizitätsversorgungsunternehmen. Neuer Begriff für Elektrizitätswerk (EW)
ESöV	Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr
HSLU	Hochschule Luzern Technik & Architektur, Horw
öV	öffentlicher Verkehr
SOC	Ladezustand des Speichers in Prozent → englischer Begriff: „State of charge“
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TPB / VB	Transports publics de Bienne
TU	Transportunternehmen
VB / TPB	Verkehrsbetriebe Biel

8-2 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Pendelbetrieb	7
Abbildung 2: Leistungsmessung vom Juli 2017	7
Abbildung 3: Allgemeines Konzept	8
Abbildung 4: AC-Ankopplung	9
Abbildung 5: PV-Anlage in Magglingen	9
Abbildung 6: Tagesenergie: Hilfsbetriebe und Fahrzeugladung	10
Abbildung 7: Tagesenergie: Antriebsenergie und Eigenverbrauchsgrad	10
Abbildung 8: Tagesenergie: Antriebsenergie und PV-Ertrag	11
Abbildung 9: Gesamter Energiefluss	12
Abbildung 10: Système à-va-et-vient	13
Abbildung 11: Mesure de puissance en juillet 2017	13
Abbildung 12: Concept général	14
Abbildung 13: Couplage-AC	15
Abbildung 14: Installation photovoltaïque (→ PV) de Macolin	15
Abbildung 15: Energie quotidienne: services auxiliaires et recharge des voitures	16
Abbildung 16: Énergie quotidienne: énergie pour l'entraînement et autoconsommation	16
Abbildung 17: Énergie quotidienne: énergie génératrice de l'entraînement et production PV	17
Abbildung 18: Flux d'énergies globaux	18
Abbildung 19: Bildimpressionen zum Projekt	19
Abbildung 20: Stromverbrauch nach Kundenkategorie	20
Abbildung 21: Pendel- und Umlaufbetrieb	21
Abbildung 22: Leistungsmessung vom Juli 2017	22
Abbildung 23: Antriebsumrichter	23
Abbildung 24: Energiemessung vom Juli 2017	23
Abbildung 25: Treppe entlang der Strecke	26
Abbildung 26: Elektrischer Notantrieb	26
Abbildung 27: LSB "Brest" und LSB "Frümsen – Staubern"	28
Abbildung 28: Allgemeines Konzept	29
Abbildung 29: Speichertechnologie	30
Abbildung 30: DC-Ankopplung	33
Abbildung 31: AC-Ankopplung	34
Abbildung 32: PV-Anlage in Magglingen	35
Abbildung 33: Energiemanagementsteuerung	36
Abbildung 34: EMS, Ansicht "Übersicht"	37
Abbildung 35: EMS, Ansicht "Einstellungen"	37
Abbildung 36: Tagesenergie: Hilfsbetriebe und Fahrzeugladung	40
Abbildung 37: Tagesenergie: Antriebsenergie und Eigenverbrauchsgrad	41
Abbildung 38: Täglicher Energiebedarf im Winter	42
Abbildung 39: Täglicher Energiebedarf im Sommer	43
Abbildung 40: Tagesenergie: Antriebsenergie und PV-Ertrag	45
Abbildung 41: Tagesenergie: Antriebsenergie, PV-Ertrag und Eigenverbrauchsgrad	46
Abbildung 42: Täglicher Energiebedarf mit der PV-Anlage	47
Abbildung 43: Gesamter Energiefluss	48
Abbildung 44: Darstellung der Kräfte	61
Abbildung 45: Kräfte der Seilabschnitte eines Aufzuges	65
Abbildung 46: Kräfte der Seilabschnitte eines Schrägaufzuges	66
Abbildung 47: Diagramm Übersicht der Kräfte	70
Abbildung 48: Diagramm Übersicht der Kräfte bei verschiedenen Fällen	71
Abbildung 49: Diagramm Übersicht der Kräfte mit Gegenseil	73
Abbildung 50: Diagramm Übersicht der Kräfte bei verschiedenen Fällen mit einem Gegenseil	74
Abbildung 51: Diagramm Übersicht der Energie	83
Abbildung 52: Diagramm Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen	84
Abbildung 53: Diagramm Übersicht der Energie mit Gegenseil	86
Abbildung 54: Diagramm Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen mit Gegenseil	87
Abbildung 55: Einflussfaktoren	93
Abbildung 56: Diagramm Längenprofil	94
Abbildung 57: Diagramm Vergleich der Leistungen bei verschiedenen Fällen	96
Abbildung 58: Diagramm Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen	97

8-3 TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle 1: Betriebliche Eckdaten von Pendelbahnen</i>	24
<i>Tabelle 2: SCAPs und Li-Ion Batterien</i>	30
<i>Tabelle 3: Technologie der Batterien</i>	32
<i>Tabelle 4: Bezugsenergie im Jahr 2017</i>	39
<i>Tabelle 5: Rückspeiseenergie im Jahr 2017</i>	39
<i>Tabelle 6: Bezugsenergie (ohne Speicher) im Jahr 2020</i>	44
<i>Tabelle 7: Rückspeiseenergie (ohne Speicher) im Jahr 2020</i>	44
<i>Tabelle 8: Investitionskosten</i>	50
<i>Tabelle 9: Ertrag</i>	50
<i>Tabelle 10: Hangabtriebskraft</i>	62
<i>Tabelle 11: Rollwiderstand des Fahrzeuges</i>	63
<i>Tabelle 12: Luftwiderstand</i>	64
<i>Tabelle 13: Gewichtskraft der Seilabschnitte</i>	67
<i>Tabelle 14: Rollwiderstand der Seilabschnitte</i>	68
<i>Tabelle 15: Übersicht aller Kräfte</i>	69
<i>Tabelle 16: Legende zum Diagramm "Übersicht der Kräfte"</i>	70
<i>Tabelle 17: Legende zum Diagramm "Übersicht Kräfte bei verschiedenen Fällen "</i>	71
<i>Tabelle 18: Übersicht aller Kräfte mit einem Gegenseil</i>	72
<i>Tabelle 19: Legende zum Diagramm "Übersicht der Kräfte mit einem Gegenseil"</i>	73
<i>Tabelle 20: Legende zum Diagramm "Übersicht Kräfte bei verschiedenen Fällen mit einem Gegenseil"</i> .	74
<i>Tabelle 21: Energie bei Steigung bzw. Gefälle</i>	76
<i>Tabelle 22: Energie der Rollreibung des Fahrzeuges</i>	77
<i>Tabelle 23: Energie des Luftwiderstandes</i>	78
<i>Tabelle 24: Energie der Seilabschnitte</i>	80
<i>Tabelle 25: Energie der Rollreibung der Seilabschnitte</i>	81
<i>Tabelle 26: Übersicht aller Energie</i>	82
<i>Tabelle 27: Legende zum Diagramm "Übersicht der Energie"</i>	83
<i>Tabelle 28: Legende zum Diagramm "Übersicht Energie bei verschiedenen Fällen"</i>	84
<i>Tabelle 29: Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen</i>	85
<i>Tabelle 30: Übersicht aller Energie mit Gegenseil</i>	85
<i>Tabelle 31: Legende zum Diagramm "Übersicht der Energie mit Gegenseil"</i>	86
<i>Tabelle 32: Legende zum Diagramm "Übersicht Energie bei verschiedenen Fällen mit Gegenseil"</i>	87
<i>Tabelle 33: Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen mit Gegenseil</i>	88
<i>Tabelle 34: Übersicht der Trägheitsmomente</i>	91
<i>Tabelle 35: Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen</i>	93
<i>Tabelle 36: Legende zum Diagramm "Längenprofil"</i>	94
<i>Tabelle 37: Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen</i>	95
<i>Tabelle 38: Legende zum Diagramm "Übersicht der Leistungen bei verschiedenen Fällen"</i>	96
<i>Tabelle 39: Legende zum Diagramm "Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen"</i>	97
<i>Tabelle 40: Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen</i>	98

10. Literaturverzeichnis

- [1] GrischConsulta, SBS Schriften 06_d: Energiemanagement Bergbahnen: Handbuch, Bern/Chur: Seilbahnen Schweiz (SBS), 2010.
- [2] Lehrstuhl für fml, TU München, 2020. [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/xx/document/read/56527720/skript-seilbahntechnik-lehrstuhl-fur-fml>. [Zugriff am 20.10.2020].
- [3] HSLU T&A, O. Duvanel, «Machbarkeitsstudie wirtschaftlicher Einsatz von PV-Anlage mit Speicher,» Horw, 2017.
- [4] Bundesamt für Energie BFE, «Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2019,» Bundesamt für Energie BFE, Ittigen, 2020.
- [5] BAV, Bundesamt für Verkehr (R. Sperlich), «Medienanlass vom 24.09.2020,» BAV, Bundesamt für Verkehr, Bern und Biel, 2020.
- [6] Gruppe Doppelmayr / Garaventa, «Antriebslösungen nach Maß,» [Online]. Available: <https://www.doppelmayr.com/de/baugruppen/antriebsloesungen/antriebsloesungen-broschuere/>. [Zugriff am 21.10.2020].
- [7] Sécheron SA, «Energiespeichersystem,» Sécheron SA, Meyrin, 2007.
- [8] H. U. Zeller, «Einsatz von Energiespeichern bei Seilbahnen mit Pendelbetrieb,» Stans, 2020.
- [9] BMF, N. Chapuis, «Brest: Le téléphérique urbain,» BMF, Flums, 2017.
- [10] D. Bumann, «Die erste batteriebetriebene Gondelbahn der Welt,» VTK/UCT, 2018.
- [11] M. S. u. I. Stadler, Energiespeicher- Bedarf, Technologien, Integration, Berlin: Springer Vieweg, 2017.

Anhang

1 Modellierung einer Pendelbahn

1.1 EINLEITUNG

In diesem Anhang geht es um eine einfache Modellierung des Fahrzeuges. Das Ziel dieses “vereinfachten” Modelles ist es, die verschiedenen Grössen berechnen zu können:

- Kräfte, die am Fahrzeug wirken
- Energie, die der Antrieb für eine Fahrt braucht
- Leistung, die der Antrieb benötigt

Die spezifischen Berechnungen basieren sich auf den Messungen vom Juli 2017 und auf der Standseilbahn “Biel-Magglingen” vor dem Umbau im Sommer 2019. Im Abschnitt 8.1 werden die Unterschiede vor und nach dem Umbau im Sommer 2019 speziell erwähnt.

2 Kräfte

2.1 KRÄFTE AM WAGEN

Die externen Einflussgrössen wie das Wagengewicht, Streckenprofil sowie die Verluste, wirken hier ein. Für all diese Elemente mussten Annahmen bezüglich ihrer Parameter getroffen oder die realen Werte eruiert werden. Die verschiedenen Kräfte können mittels physikalischer Gesetze bestimmt werden. Nachfolgend werden die wirkenden Kräfte graphisch dargestellt.

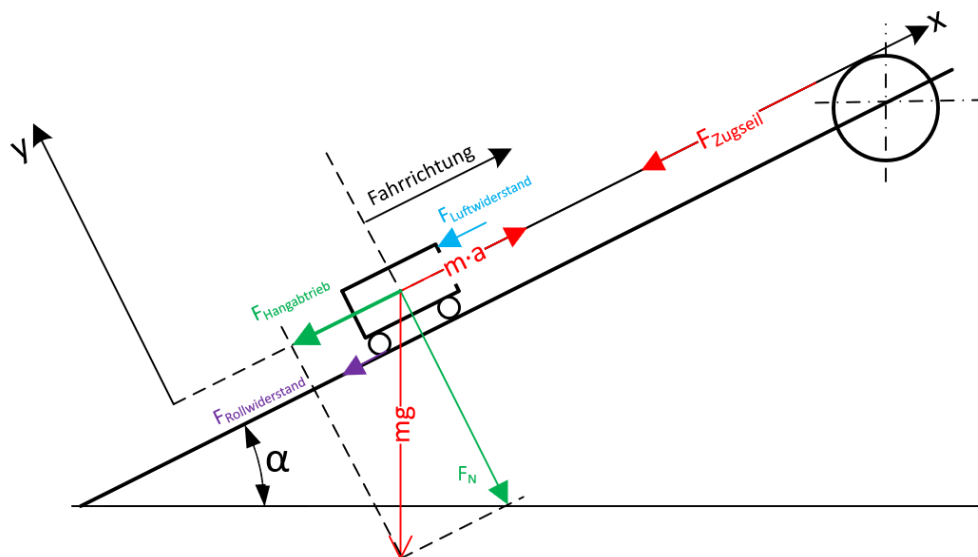


Abbildung 44: Darstellung der Kräfte

2.1.1 Steigung und Gefälle (Hangabtriebskraft)

Durch die Steigung i in Prozent des Geländes und dem totalen Fahrzeuggewicht m_{Tot} wird die Hangabtriebskraft beeinflusst. Per Definition ist die Steigung i der Quotient von Δy und Δx . Diese Zahl wird üblicherweise in Prozent angegeben.

Wenn i positiv ist spricht man von Steigung. Wenn i negativ ist spricht man von Gefälle. In der Seilbahntechnik liegen diese Zahlen im Bereich von 15...60%, sehr selten bis zu 120%.

$$F_{StGe} = F_G \cdot \sin(\alpha) = m_{Tot} \cdot g \cdot \sin(\alpha) = m_{Tot} \cdot g \cdot \sin(\arctg(i))$$

Gesamtes Gewicht des Fahrzeuges: $m_{Tot} = 13'790 + N_{pers} \cdot 80 \text{ [kg]}$
 Fallbeschleunigung: $g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
 Steigung (+) oder Gefälle (-): $i = 15 \dots 90 \text{ [%]}$
 Winkel: $\alpha = 8.5 \dots 42 \text{ [}^\circ\text{]}$

Die Hangabtriebskraft ist einerseits von dem gesamten Gewicht des Fahrzeuges und andererseits vom Fahrprofil (Strecke) abhängig.

Fall			Leer	Halbvoll	Voll
Anzahl Fahrgäste	N_{pers}	[-]	0	60	120
Gesamtes Gewicht	m_{Tot}	[kg]	13'790	18'590	23'390
Fall	Steigung	Winkel	Hangabtriebskraft		
	i	α	F_{StGe}	F_{StGe}	F_{StGe}
	[%]	[°]	[kN]	[kN]	[kN]
Flach	0	0	0.0	0.0	0.0
Steigung Gefälle	15	8.53	20.1	27.1	34.0
	30	16.70	38.9	52.4	65.9
	45	24.23	55.5	74.8	94.2
	60	30.96	69.6	93.8	118.1
	90	41.99	90.5	122.0	153.5

Tabelle 10: Hangabtriebskraft

Bei einer Steigung (→ bergwärts) sind die Kräfte positiv gezählt. In diesem Fall muss der Antriebsmotor antreiben und bezieht deshalb Leistung vom Netz.

Bei einem Gefälle (→ talwärts) sind die Kräfte negativ gezählt. In diesem Fall muss der Antriebsmotor bremsen und speist deshalb Leistung ins Netz zurück.

Die mittlere Steigung der SSB "Biel-Magglingen" liegt bei 27.1 %. Die entsprechenden Kräfte sind in der obenstehenden Tabelle fett markiert.

2.1.2 Rollreibung Wagen

Diese Kraft wird durch das Abrollen des Rades auf die Schienen hervorgerufen. Da die Stahlräder und die Schiene leicht verformbar sind, muss diese Kraft jeweils überwunden werden. Der Rollwiderstandskoeffizient der Wagen μ_{RollWa} wird mit der auf den Wagen wirkenden Normalkraft F_N multipliziert. Die Multiplikation der Erdanziehungskraft mit dem $\cos(\alpha)$ ergibt die Normalkraft F_N , da in der vorliegenden Simulation der Winkel jeweils gross ($\alpha > 15^\circ$) bleibt, muss dieser berücksichtigt werden:

$$F_{RollWa} = \mu_{RollWa} F_N = \mu_{RollWa} \cdot g \cdot m_{Tot} \cdot \cos(\alpha)$$

Fallbeschleunigung: $g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
 Gesamtes Gewicht des Fahrzeugs: $m_{Tot} = 13'790 + N_{Pers} \cdot 80 \text{ [kg]}$
 Maximale Zuladung: $N_{Pers} = 120 \text{ Fahrgäste}$
 Rollwiderstandskoeffizient: $\mu_{RollWa} = 0.003 \text{ [-]}$

Die Rollwiderstandskraft ist nur abhängig vom gesamten Gewicht des Fahrzeugs und von der Neigung. In der praktischen Anwendung ist der Einfluss der Neigung (bis $\pm 30\%$) vernachlässigbar. Ab einer Neigung von 33% (\rightarrow Winkel $\alpha = 18^\circ$) liegt der Fehler bei mehr als 5% .

Fall	Anzahl Fahr- gäste	Gesamtes Gewicht		Nor- mal- kraft	Rollwi- der- stand		Nor- mal- kraft	Rollwi- der- stand
	N_{Pers}	m_{Tot}	Steigung 0 [%] Winkel α 0.0 [°]	F_N	F_{RollWa}	Steigung 15 [%] Winkel α 8.53 [°]	F_N	F_{RollWa}
	[-]	[kg]		[kN]	[kN]		[kN]	[kN]
Leer	0	13'790		135	0.41		134	0.40
Halb Voll	60	18'590	Steigung 30 [%] Winkel α 16.7 [°]	182	0.55	Steigung 45 [%] Winkel α 24.2 [°]	180	0.54
Voll	120	23'390		229	0.69		227	0.68
	N_{Pers}	m_{Tot}	Steigung 60 [%] Winkel α 31.0 [°]	F_N	F_{RollWa}	Steigung 90 [%] Winkel α 42.0 [°]	F_N	F_{RollWa}
	[-]	[kg]		[kN]	[kN]		[kN]	[kN]
Leer	0	13'790		116	0.35		101	0.30
Halb Voll	60	18'590	Steigung 90 [%] Winkel α 42.0 [°]	156	0.47	Steigung 90 [%] Winkel α 42.0 [°]	136	0.41
Voll	120	23'390		197	0.59		171	0.51

Tabelle 11: Rollwiderstand des Fahrzeuges

Die mittlere Steigung der SSB "Biel-Magglingen" liegt bei 27.1% . Die entsprechenden Kräfte sind in der obenstehenden Tabelle fett markiert.

2.1.3 Luftwiderstand

Der Einfluss der Luftverdrängung steigt quadratisch zur Geschwindigkeit an. Die Geschwindigkeiten für Pendelbahnen sind normalerweise klein ($< 36 \text{ km/h} \leftrightarrow 10 \text{ m/s}$), weshalb der Einfluss noch nicht so gravierend ist. Der Wagen weist eine Frontfläche von $A_{\text{Wa}} = 3.3 \text{ m} \cdot 2.51 \text{ m} = \text{ca. } 8.3 \text{ m}^2$ auf.

$$F_{\text{Luft}} = \frac{1}{2} c_w \rho_{\text{Luft(avg)}} v^2 A_{\text{Fz}}$$

Pendelbahn Frontfläche:	$A_{\text{Wa}} = 8.28 \text{ [m}^2\text{]}$
Strömungswiderstandskoeffizient:	$c_w = 1.0 \text{ [-]}$
Luftdichte (Mittelwert 10.5°C, 450 müM):	$\rho_{\text{Luft(avg)}} = 1.18 \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{]}$
Geschwindigkeit des Fahrzeugs (0...36 km/h)	$v = 0 \dots 10 \text{ [m/s]}$

Der Luftwiderstand ist nur abhängig von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs.

Fahrgeschwindigkeit		Luftwiderstand
v		F_{Luft}
[m/s]	[km/h]	[kN]
0.0	0.0	0.00
2.0	7.2	0.02
4.0	14.4	0.08
5.0	18.0	0.12
6.0	21.6	0.18
8.0	28.8	0.31
10.0	36.0	0.49

Tabelle 12: Luftwiderstand

Im normalen Fall fährt die SSB “Biel-Magglingen“ bei einer Geschwindigkeit von 4.8 m/s. Dies entspricht die 80 % der Nenngeschwindigkeit. Die entsprechenden Kräfte sind in der Tabelle fett markiert.

2.2 KRÄFTE AM ZUG- BZW. GEGENSEIL

Da sich die Seillänge während der Fahrt ständig vergrössert bzw. vermindert, muss diese Seilhangabtriebskraft berechnet werden. Dies kann in zwei Schritten berechnet werden:

- Fall Aufzug ($\alpha=90^\circ$)
- Fall Seilbahn ($\alpha \neq 90^\circ$)

Untenstehend wird ein einfacher “Aufzug” dargestellt. Hier kann das Verhalten der beiden Seilabschnitte L1 bzw. L2 des Zugseils gut beobachtet werden.

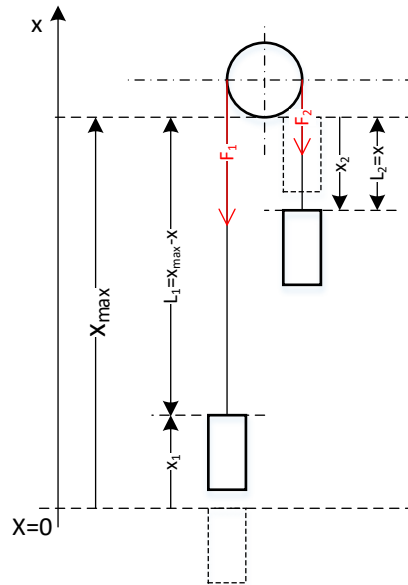


Abbildung 45: Kräfte der Seilabschnitte eines Aufzuges

2.2.1 Fall "Aufzug"

Seillänge L_1	Seillänge L_2	
$l_{1(x)} = (x_{max} - x)$	$l_{2(x)} = x$	
Gewicht des Seilabschnitts L_1	Gewicht des Seilabschnitts L_2	
$m_1 = l_{1(x)} \cdot m' = m' (x_{max} - x)$	$m_2 = l_{2(x)} \cdot m' = m' (x)$	
Gewichtskraft des Seilabschnitts L_1	Gewichtskraft des Seilabschnitts L_2	
$F_1 = m_1 \cdot g = + m' (x_{max} - x) \cdot g$	$F_2 = m_2 \cdot g = + m' \cdot x \cdot g$	
Die Kraft F_1 reduziert sich.	Die Kraft F_2 vergrößert sich.	

Gleichung 1: Gewichtskräfte Aufzug

Anhand des vereinfachten Aufzugsmodells kann dieses Modell als Schrägaufzug erweitert werden. In diesem Fall liegt der Neigungswinkel bei einem Wert kleiner als 90 Grad.

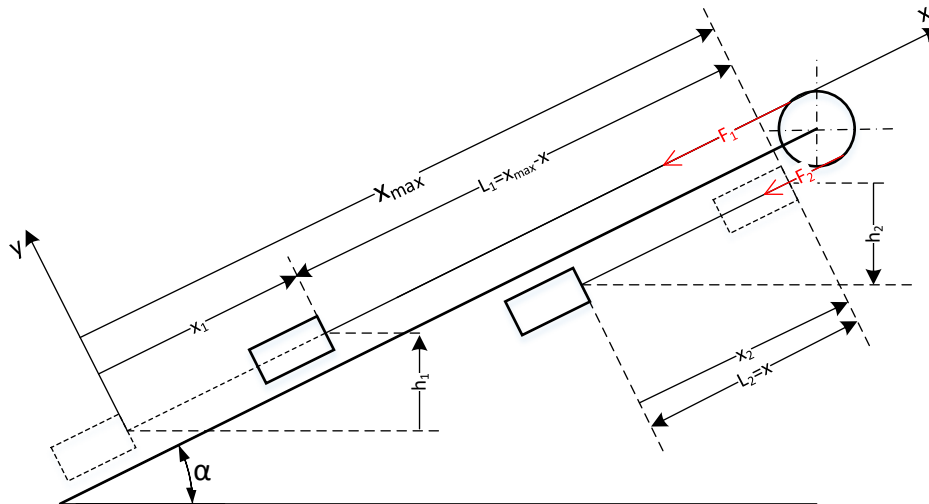


Abbildung 46: Kräfte der Seilabschnitte eines Schrägaufzuges

2.2.2 Fall "Schrägaufzug"

Seillänge L_1	Seillänge L_2	
$l_{1(x)} = (x_{\max} - x)$	$l_{2(x)} = x$	
$m_1 = l_1 \cdot m' = m' (x_{\max} - x)$	$m_2 = l_2 \cdot m' = m' (x)$	
$h_{1(x)} = +x \cdot \sin \alpha$	$h_{2(x)} = -x \cdot \sin \alpha$	
Gewichtskraft des Seilabschnitts L_1	Gewichtskraft des Seilabschnitts L_2	
$F_{1(x)} = m' \cdot l_{1(x)} \cdot g \cdot \sin \alpha$	$F_{2(x)} = m' \cdot l_{2(x)} \cdot g \cdot \sin \alpha$	
$F_{1(x)} = m' \cdot g \cdot (x_{\max} - x) \cdot \sin \alpha$	$F_{2(x)} = m' \cdot g \cdot x \sin \alpha$	
Die Kraft F_1 reduziert sich.	Die Kraft F_2 vergrößert sich.	

Gleichung 2: Gewichtskräfte Schrägaufzug

Fallbeschleunigung: $g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
 Spezifisches Gewicht des Zugseiles: $m'_{Zs} = 5.3 \text{ [kg/m]}$
 Spezifisches Gewicht des Gegenseiles: $m'_{Gs} = 0.0 \text{ [kg/m]}$
 Länge der Strecke: $x_{\max} = 1693.6 \text{ [m]}$
 Steigung (+) oder Gefälle (-): $i = 15 \dots 90 \text{ [%]}$
 Winkel : $\alpha = 8.5 \dots 42 \text{ [}^\circ\text{]}$

Verhältnis L_1/L_2	x/x_{\max}	[%]	0		25		50		75		100	
Seillänge L_1	x_1	[m]	1693.6		1270.2		846.8		423.4		0.0	
Seillänge L_2	x_2	[m]	0.0		423.4		846.8		1270.2		1693.6	
Gewicht Seilabschnitt L_1	m_1	[kg]	8976		6732		4488		2244		0	
Gewicht Seilabschnitt L_2	m_2	[kg]	0		2244		4488		6732		8976	
Fall	Steigung	Winkel	Gewichtskraft des Seilab- schnitts L_1 bzw. L_2		Gewichtskraft des Seilab- schnitts L_1 bzw. L_2		Gewichtskraft des Seilab- schnitts L_1 bzw. L_2		Gewichtskraft des Seilab- schnitts L_1 bzw. L_2		Gewichtskraft des Seilab- schnitts L_1 bzw. L_2	
	i	α	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2
	[%]	[°]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
Steigung Gefälle	15	8.53	13.1	0.0	9.8	3.3	6.5	6.5	3.3	9.8	0.0	13.1
	30	16.70	25.3	0.0	19.0	6.3	12.7	12.7	6.3	19.0	0.0	25.3
	45	24.23	36.1	0.0	27.1	9.0	18.1	18.1	9.0	27.1	0.0	36.1
	60	30.96	45.3	0.0	34.0	11.3	22.7	22.7	11.3	34.0	0.0	45.3
	90	41.99	58.9	0.0	44.2	14.7	29.5	29.5	14.7	44.2	0.0	58.9

Tabelle 13: Gewichtskraft der Seilabschnitte

Die mittlere Steigung der SSB “Biel-Magglingen“ liegt bei 27.1%. Die entsprechenden Kräfte sind in der Tabelle fett markiert.

2.2.3 Rollreibung Seil

Wie der Wagen weisen die beiden Seile Reibungswiderstände auf. Da das Gesamtgewicht der Seile konstant bleibt, bleibt auch die gesamte Rollreibungskraft konstant.

Fallbeschleunigung: $g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
 Spezifisches Gewicht des Zugseiles: $m'_{Zs} = 5.3 \text{ [kg/m]}$
 Spezifisches Gewicht des Gegenseiles: $m'_{Gs} = 0.0 \text{ [kg/m]}$
 Länge der Strecke: $s = 1693 \text{ [m]}$
 Rollwiderstandskoeffizient Seil: $\mu_{\text{RollSe}} = 0.03 \text{ [-]}$

$$F_{RollZs} = \mu_{RollSe} F_{NZs} = \mu_{RollZs} \cdot m'_{Zs} \cdot s \cdot g \cdot \cos(\alpha_{avg})$$

$$F_{RollGs} = \mu_{RollSe} F_{NGs} = \mu_{RollGs} \cdot m'_{Gs} \cdot s \cdot g \cdot \cos(\alpha_{avg})$$

Die Rollwiderstandskraft des Seiles ist nur abhängig vom Gewicht des Seiles und der Neigung. In der praktischen Anwendung ist der Einfluss der Neigung (bis $\pm 30\%$) vernachlässigbar. Ab einer Neigung von 33% (\rightarrow Winkel $\alpha = 18^\circ$) liegt die Fehler bei mehr als 5% .

Steigung	Winkel	Gewicht	Normalkraft	Rollwiderstand
i	α	m_{Zs}	F_{NZs}	F_{RollZs}
[%]	[°]	[kg]	[kN]	[kN]
0	0.0	8'976	88	2.64
15	8.5	8'976	87	2.61
30	16.7	8'976	84	2.53
45	24.2	8'976	80	2.41
60	31.0	8'976	76	2.27
90	42.0	8'976	65	1.96

Tabelle 14: Rollwiderstand der Seilabschnitte

Die mittlere Steigung der SSB "Biel-Magglingen" liegt bei 27.1% . Die entsprechenden Kräfte sind in der Tabelle fett markiert.

2.3 ZUSAMMENSTELLUNG DER KRÄFTE

2.3.1 Fall "Ohne Gegenseil"

Damit die Tabelle übersichtlich bleibt, wird nur der folgende Fall berücksichtigt:

- Wagen 1 bzw. Wagen 2 halb beladen (\rightarrow d.h. 60 Fahrgäste)
- Fahrgeschwindigkeit 5.0 m/s (\rightarrow 18 km/h)
- Steigung bzw. Gefälle 30% (\rightarrow 16.7°)

Der Wagen 1 befindet sich in der Talstation und fährt bergwärts. Die Kräfte am Antriebsrad sind positiv gezählt, wenn sie in derselben Richtung wie die Fahrgeschwindigkeit liegen.

Verhältnis L_1/L_2	x/x_{\max}	[%]	0		25		50		75		100	
Seillänge L_1	x_1	[m]	1693.6		1270.2		846.8		423.4		0.0	
Seillänge L_2	x_2	[m]	0.0		423.4		846.8		1270.2		1693.6	
			F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2
			[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
Rollwiderstand Wagen	Halb voll $i=30\%$		0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
Rollwiderstand Zugseil	$i=30\%$		2.53	0.00	1.90	0.63	1.27	1.27	0.63	1.90	0.00	2.53
Luftwiderstand	$v=5.0$ m/s		0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
Neigung / Gefälle	Halb voll $i=30\%$		52.4	-52.4	52.4	-52.4	52.4	-52.4	52.4	-52.4	52.4	-52.4
Gewichtskraft Zugseil	$i=30\%$		25.3	0.0	19.0	-6.3	12.7	-12.7	6.3	-19.0	0.0	-25.3
Summe	pro Seilabschnitt		80.9	-51.8	73.9	-57.5	67.0	-63.1	60.0	-68.8	53.0	-74.5
Summe	am Antriebsrad		29.1		16.5		3.8		-8.8		-21.5	

Tabelle 15: Übersicht aller Kräfte

Alle Kräfte in Abhängigkeit der Strecke werden für die Anlage “Biel-Magglingen” graphisch dargestellt. Die Legende der verschiedenen Kurven wird tabellarisch veranschaulicht:

Name	Legende	Erklärung / Bemerkung
x-Achse	x	Fahrstrecke in Meter [m]
y-Achse	y	Kräfte in Kilonewton [kN]
Rote Volllinie	FStGeWa1	Hangabtriebskraft Wagen 1 bergwärts
Blaue Volllinie	FZs1	Gewichtskraft des Zugseiles 1 bergwärts
Rote feine Linie	$\Sigma F_{\text{Roll/Luft1Zs1}}$	Summe der Rollreibungs- bzw. Luftwiderstand von Wagen 1 / Zugseil 1 bergwärts
Grüne Strichlinie	ΣW_{a1+Zs1}	Summe der Kräfte am Seilabschnitt 1 bergwärts
Orange Volllinie	FStGeWa2	Hangabtriebskraft Wagen 2 talwärts
Hellblaue Volllinie	FZs2	Gewichtskraft des Zugseiles 2 talwärts
Orange feine Linie	$\Sigma F_{\text{Roll/Luft2Zs2}}$	Summe der Rollreibungs- bzw. Luftwiderstand von Wagen 2 / Zugseil 2 talwärts
Hellgrüne Strichlinie	ΣW_{a2+Zs2}	Summe der Kräfte am Seilabschnitt 2 talwärts
Schwarze Volllinie	Antriebsrad	Summe der Kräfte am Antriebsrad (“+” → Antreiben)

Tabelle 16: Legende zum Diagramm “Übersicht der Kräfte”

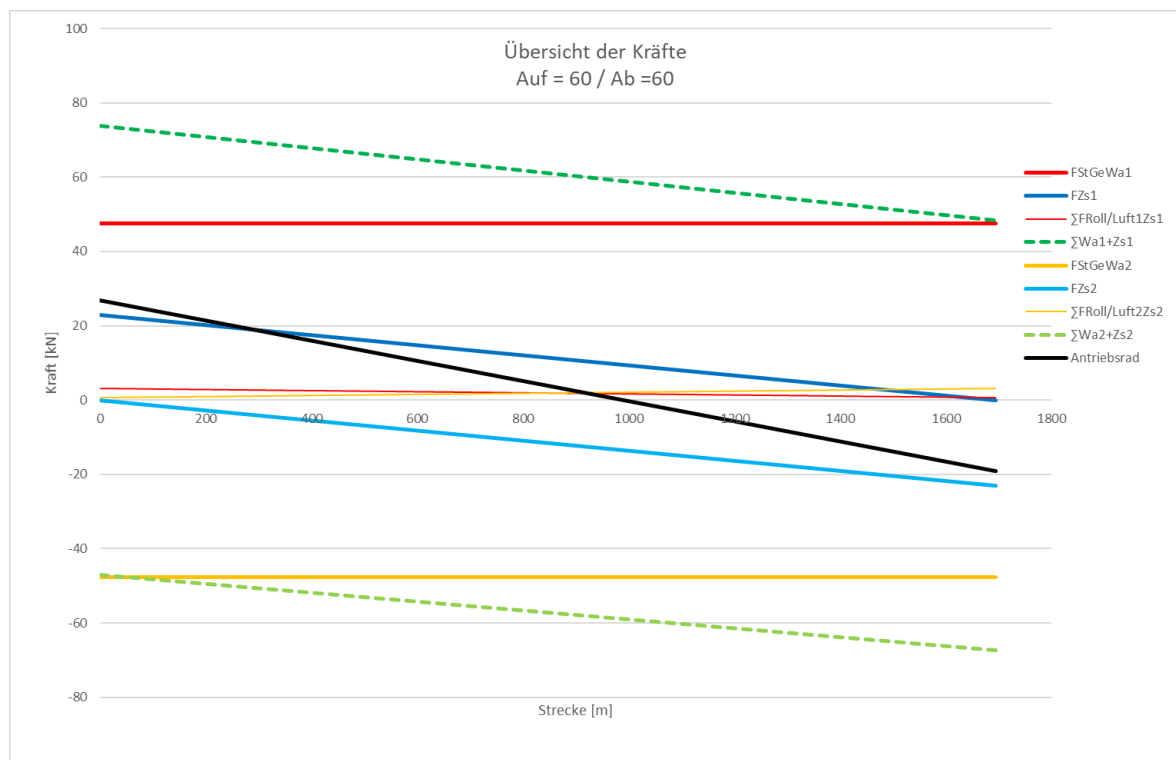


Abbildung 47: Diagramm Übersicht der Kräfte

Ein paar interessante Lastfälle für die Anlage “Biel-Magglingen” sind graphisch dargestellt. Die Legende der verschiedenen Kurven wird tabellarisch veranschaulicht:

Name	Legende	Erklärung / Bemerkung
x-Achse	x	Fahrstrecke in Meter [m]
y-Achse	y	Kräfte in Kilonewton [kN]
Rote Volllinie	Fall "Auf 120 / Ab 0"	Extremfall Last bergwärts (W1 → N=120 / W2 → N=0)
Grüne Volllinie	Fall "Leer"	Fall “leer” (W1 → N=0 / W2 → N=0)
Orange Volllinie	Fall "Auf 60 / Ab 60"	Fall “Mitte” (W1 → N=60 / W2 → N=60)
Blaue Volllinie	Fall "Auf 0 / Ab 120"	Extremfall Last talwärts (W1 → N=0 / W2 → N=120)

Tabelle 17: Legende zum Diagramm “Übersicht Kräfte bei verschiedenen Fällen ”

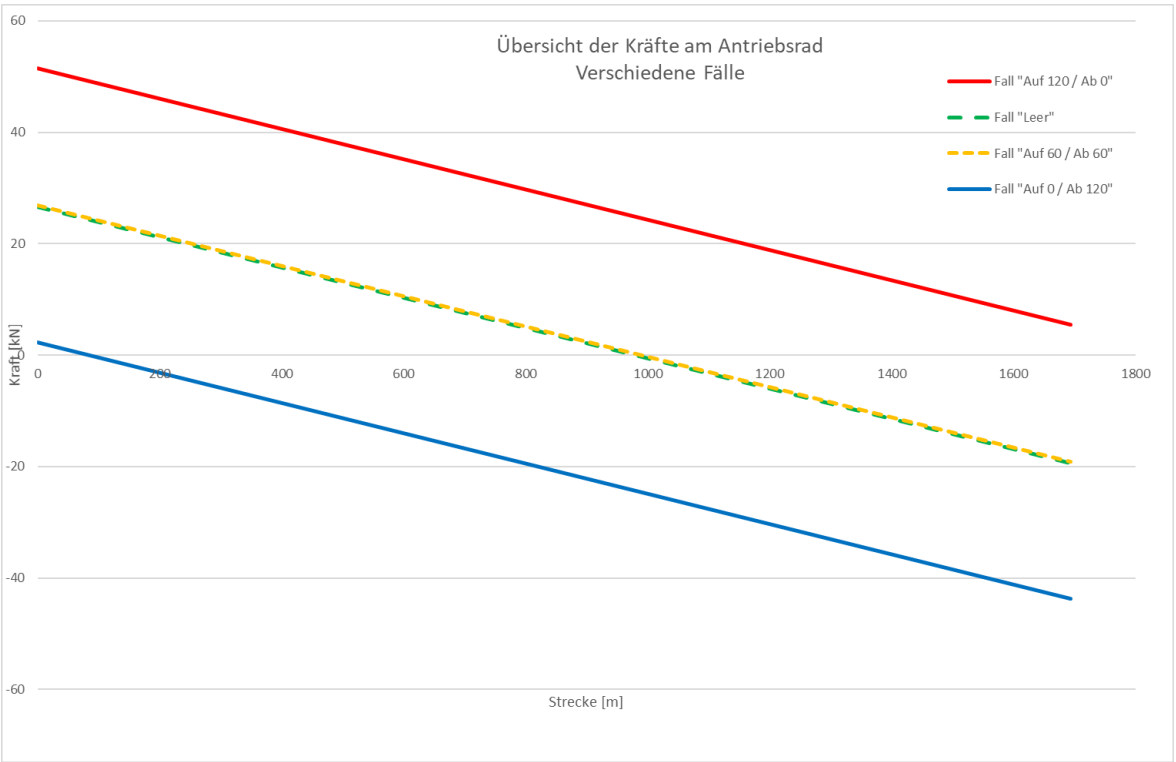


Abbildung 48: Diagramm Übersicht der Kräfte bei verschiedenen Fällen

2.3.2 Fall “Mit Gegenseil”

Da es viele Pendelbahnen mit einem Gegenseil ausgerüstet sind, macht es Sinn die Wirkung des Gegenseiles zu überprüfen. Hier wurde das Gegenseil mit einem halbierten Durchmesser ausgewählt. Als Folge liegt sein spezifisches Gewicht bei einem Viertel des Zugseiles.

Die Anlagedaten ausser dem Gegenseil bleiben gleich und werden untenstehend dargestellt:

Fallbeschleunigung:	g	$= 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
Spezifisches Gewicht des Zugseiles:	m'_{Zs}	$= 5.30 \text{ [kg/m]}$
Spezifisches Gewicht des Gegenseiles:	m'_{Gs}	$= 1.33 \text{ [kg/m]}$
Länge der Strecke:	s	$= 1693 \text{ [m]}$
Rollwiderstandskoeffizient Seil:	μ_{RollSe}	$= 0.03 \text{ [-]}$

Damit die Tabelle übersichtlich bleibt, wird nur der folgende Fall berücksichtigt:

- Wagen 1 bzw. Wagen 2 halb beladen (\rightarrow d.h. 60 Fahrgäste)
- Fahrgeschwindigkeit 5.0 m/s (\rightarrow 18 km/h)
- Steigung bzw. Gefälle 30% (\rightarrow 16.7°)

Der Wagen 1 befindet sich in der Talstation und fährt bergwärts. Die Kräfte am Antriebsrad sind positiv gezählt, wenn sie in derselben Richtung wie die Fahrgeschwindigkeit liegen.

Verhältnis L_1 / L_2	x/x_{\max}	[%]	0		25		50		75		100	
Seillänge L_1	x_1	[m]	1693.6		1270.2		846.8		423.4		0.0	
Seillänge L'_1	x'_1	[m]	0.0		423.4		846.8		1270.2		1693.6	
Seillänge L_2	x_2	[m]	0.0		423.4		846.8		1270.2		1693.6	
Seillänge L'_2	x'_2	[m]	1693.6		1270.2		846.8		423.4		0.0	
			F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2
			[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
Rollwiderstand Wagen	Halb voll $i=30\%$		0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
Rollwiderstand Zugseil	$i=30\%$		2.53	0.00	1.90	0.63	1.27	1.27	0.63	1.90	0.00	2.53
Rollwiderstand Gegenseil	$i=30\%$		0.00	0.63	0.16	0.47	0.32	0.32	0.47	0.16	0.63	0.00
Luftwiderstand	$v=5.0$ m/s		0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
Neigung / Gefälle	Halb voll $i=30\%$		52.4	-52.4	52.4	-52.4	52.4	-52.4	52.4	-52.4	52.4	-52.4
Gewichtskraft Zugseil	$i=30\%$		25.3	0.0	19.0	-6.3	12.7	-12.7	6.3	-19.0	0.0	-25.3
Gewichtskraft Gegenseil	$i=30\%$		0.0	-6.3	1.6	-4.7	3.2	-3.2	1.6	-1.6	6.3	0.0
Summe	pro Seilabschnitt		80.9	-57.5	75.7	-61.7	70.4	-66.0	62.1	-70.3	60.0	-74.5
Summe	am Antriebsrad		23.4		13.9		4.5		-8.2		-14.5	

Tabelle 18: Übersicht aller Kräfte mit einem Gegenseil

Alle Kräfte in Abhängigkeit der Strecke werden für eine ähnliche Anlage mit einem Gegenseil graphisch dargestellt. Die Legende der verschiedenen Kurven wird tabellarisch veranschaulicht:

Name	Legende	Erklärung / Bemerkung
x-Achse	x	Fahrstrecke in Meter [m]
y-Achse	y	Kräfte in Kilonewton [kN]
Rote Volllinie	FStGeWa1	Hangabtriebskraft Wagen 1 bergwärts
Blaue Volllinie	FZs1	Gewichtskraft des Zugseiles 1 bergwärts
Blaue Strichlinie	FGs1	Gewichtskraft des Gegenseiles 1 bergwärts
Rote feine Linie	$\Sigma F_{\text{Roll/Luft1}}$ Zs1Gs1	Summe der Rollreibungs- bzw. Luftwiderstand von Wagen 1 / Zugseil 1 / Gegenseil 1 bergwärts
Grüne Strichlinie	$\Sigma W_{a1}+Z_{s1}+G_{s1}$	Summe der Kräfte am Seilabschnitt 1 bergwärts
Orange Volllinie	FStGeWa2	Hangabtriebskraft Wagen 2 talwärts
Hellblaue Volllinie	FZs2	Gewichtskraft des Zugseiles 2 talwärts
Hellblaue Strichlinie	FGs2	Gewichtskraft des Gegenseiles 2 talwärts
Orange feine Linie	$\Sigma F_{\text{Roll/Luft2}}$ Zs2Gs2	Summe der Rollreibungs- bzw. Luftwiderstand von Wagen 2 / Zugseil 2 / Gegenseil 2 talwärts
Hellgrüne Strichlinie	$\Sigma W_{a2}+Z_{s2}+G_{s2}$	Summe der Kräfte am Seilabschnitt 2 talwärts
Schwarze Volllinie	Antriebsrad	Summe der Kräfte am Antriebsrad (“+” → Antreiben)

Tabelle 19: Legende zum Diagramm “Übersicht der Kräfte mit einem Gegenseil”

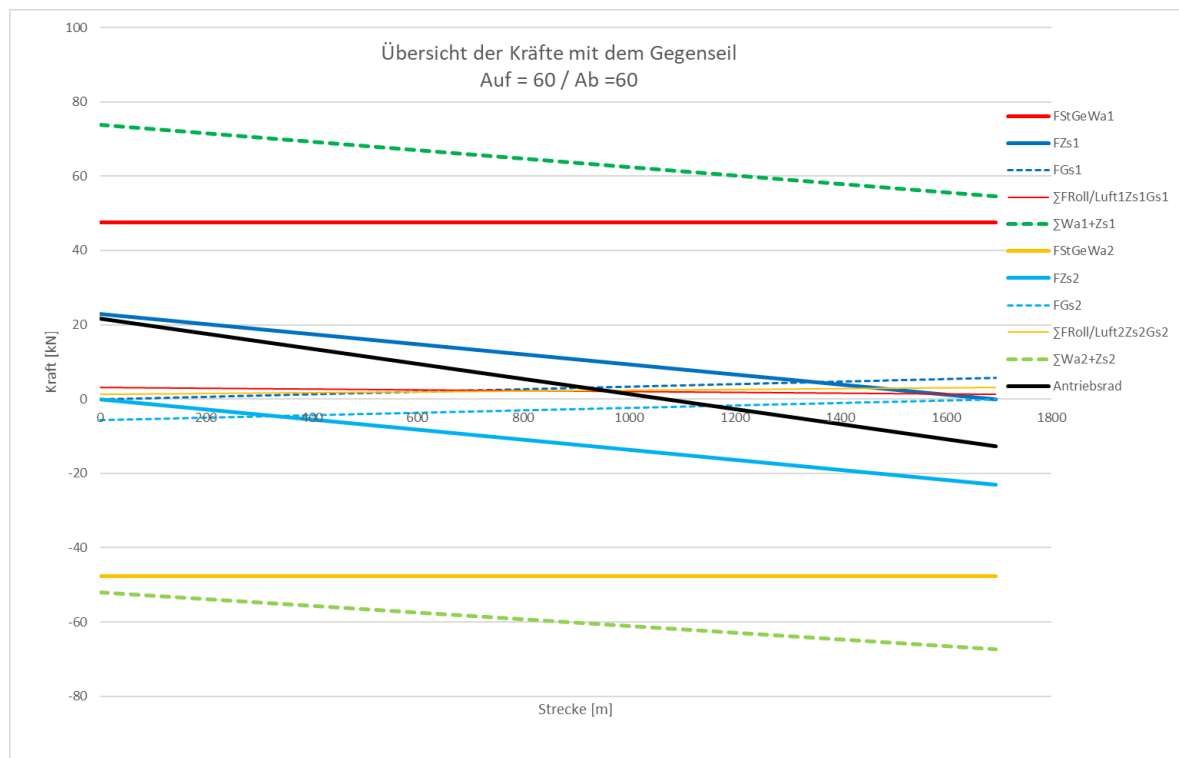


Abbildung 49: Diagramm Übersicht der Kräfte mit Gegenseil

Ein paar interessante Lastfälle für eine ähnliche Anlage mit einem Gegenseil sind graphisch dargestellt. Die Legende der verschiedenen Kurven wird tabellarisch veranschaulicht:

Name	Legende	Erklärung / Bemerkung
x-Achse	x	Fahrstrecke in Meter [m]
y-Achse	y	Kräfte in Kilonewton [kN]
Rote Volllinie	Fall "Auf 120 / Ab 0"	Extremfall Last bergwärts (W1 → N=120 / W2 → N=0)
Grüne Volllinie	Fall "Leer"	Fall “leer” (W1 → N=0 / W2 → N=0)
Orange Volllinie	Fall "Auf 60 / Ab 60"	Fall “Mitte” (W1 → N=60 / W2 → N=60)
Blaue Volllinie	Fall "Auf 0 / Ab 120"	Extremfall Last talwärts (W1 → N=0 / W2 → N=120)

Tabelle 20: Legende zum Diagramm “Übersicht Kräfte bei verschiedenen Fällen mit einem Gegenseil”

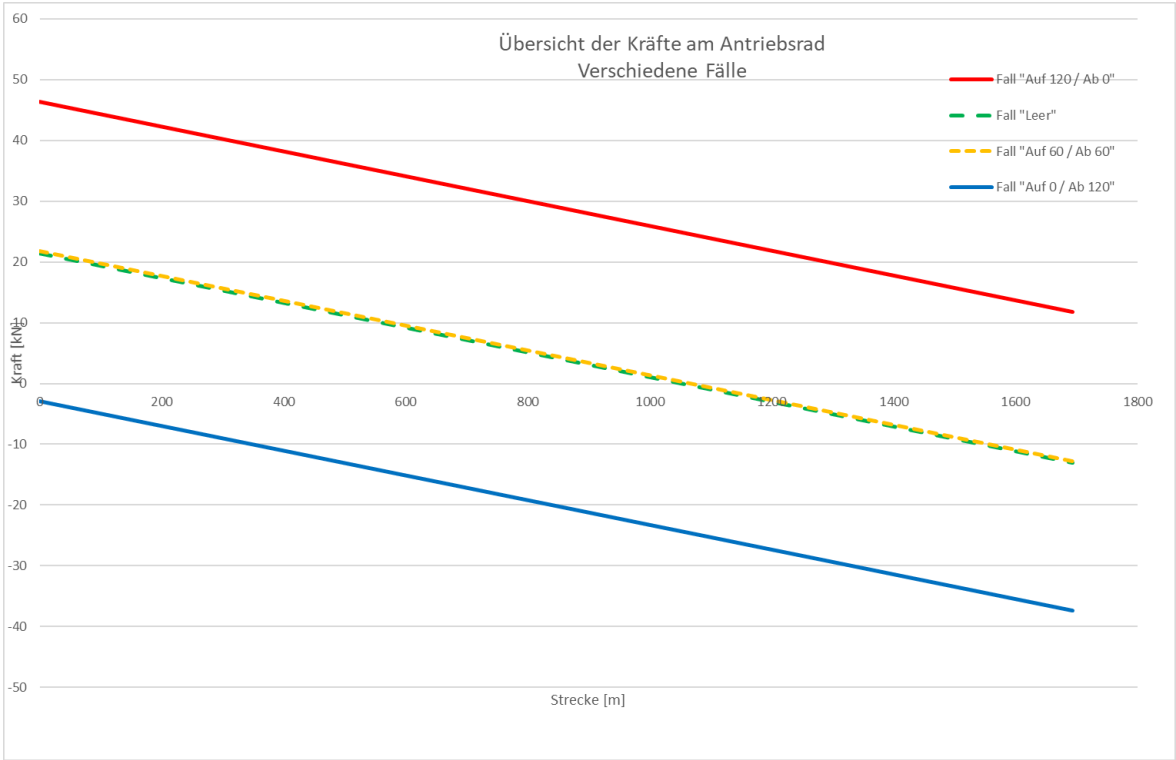


Abbildung 50: Diagramm Übersicht der Kräfte bei verschiedenen Fällen mit einem Gegenseil

2.4 ZWISCHENFAZIT UND VEREINFACHUNGEN

In der Tabelle sieht man, dass die Kraft am Antriebsrad (schwarze Linie) von positiv auf negativ wechselt. Dies bedeutet, dass der Antriebsmotor zuerst das gesamte System “Wagen + Zugseil” bis circa der Hälfte der Strecke antreiben muss. Danach muss der Antriebsmotor das gesamte System “Wagen + Zugseil” abbremsen. In diesem Fall liegt eine negative Kraft am Antriebsrad an.

Zwischenfazit

Die Ursache liegt bei der **Gewichtskraft des Zugseiles**. Das ist die einzige Kraft, welche von positiv auf negativ wechselt. Die Zellen sind grau markiert.

Dies kann so erwartet werden. Am Anfang liegt das ganze Zugseil in der Talstation und muss am Anfang der Fahrt nach oben gezogen werden. In der Mitte der Fahrt sind die beiden Längen der Seilabschnitte gleich somit die beiden Gewichtskräfte. Danach läuft das Zugseil nach unten und hilft dem bergwärts fahrenden Wagen. Je nach Verhältnis der Reibungskräfte zur Gewichtskraft des Zugseiles muss sogar das Antriebsrad gebremst werden.

Beim Vergleich der Diagramme (→ Abbildung 47 und Abbildung 49) bzw. der Diagramme (→ Abbildung 48 und Abbildung 50) ist es ersichtlich, dass das Gegenseil gegen die Wirkung vom Zugseil wirkt. Im Extremfall, wenn das Zugseil und das Gegenseil gleich ausgewählt werden, bleibt die Kraft am Antriebsrad konstant. In diesem Fall muss das Antriebsrad einerseits die Reibungskräfte kompensieren, andererseits muss es den Lastfall antreiben bzw. abbremsen.

Vereinfachungen

Der Luftwiderstand kann, wenn die Fahrgeschwindigkeit kleiner als 6.0 m/s liegt, vernachlässigt werden. Bei einer Steigung kleiner als 30% (→ Winkel $\alpha < 18^\circ$) kann die Gewichtskraft ohne Berücksichtigung von $\cos(\alpha)$ berechnet werden. In diesem Fall liegt der Fehler unter 5%.

3 Energie

Im letzten Abschnitt wurden die Kräfte berechnet. In diesem Abschnitt wird die geleistete Arbeit der Kräfte berechnet.

Die Energie kann von der Kraft abgeleitet werden mit dieser Formel.

$$E_{(x)} = F \cdot s$$

Kräfte:	F	= gemäss Abschnitt 2 [N]
Länge der Strecke	s	= 1693.6 [m]

3.1 ENERGIE DER WAGEN

3.1.1 Steigung und Gefälle

Wie im Abschnitt 2.1.1 schon erwähnt, kann die Energie von der Hangabtriebskraft abgeleitet werden.

$$E_{StGe} = F_G \cdot \sin(\alpha) \cdot s = m_{Tot} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot s = m_{Tot} \cdot g \cdot \sin(\arctg(i)) \cdot s$$

Gesamtes Gewicht des Fahrzeugs:	m_{Tot}	= $13'790 + N_{pers} \cdot 80$ [kg]
Fallbeschleunigung:	g	= 9.81 [m/s ²]
Steigung (+) oder Gefälle (-):	i	= 15...90 [%]
Winkel:	α	= 8.5...42 [°]
Länge der Strecke	s	= 1693.6 [m]

Die Energie ist von dem gesamten Gewicht des Fahrzeugs, vom Fahrprofil (Strecke) sowie von der Streckenlänge abhängig.

Fall			Leer	Halbvoll	Voll
Anzahl Fahrgäste	N_{Pers}	[-]	0	60	120
Gesamtes Gewicht	m_{Tot}	[kg]	13'790	18'590	23'390
Fall	Steigung	Winkel	Energie Steigung bzw. Gefälle		
	i	α	E_{StGe}	E_{StGe}	E_{StGe}
	[%]	[°]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Flach	0	0	0.0	0.0	0.0
Steigung Gefälle	15	8.53	9.4	12.7	16.0
	30	16.70	18.3	24.7	31.0
	45	24.23	26.1	35.2	44.3
	60	30.96	32.7	44.1	55.5
	90	41.99	42.6	57.4	72.2

Tabelle 21: Energie bei Steigung bzw. Gefälle

Bei einer Steigung (→ bergwärts) wird die Energie positiv gezählt. In diesem Fall muss der Antriebsmotor antreiben und bezieht deshalb Leistung vom Netz.

Bei einem Gefälle (→ talwärts) wird die Energie negativ gezählt. In diesem Fall muss der Antriebsmotor bremsen und speist deshalb Leistung ins Netz zurück.

Im Normalfall, wenn das Gewicht der beiden Wagen gleich ist, kompensieren sich die bergwärts- und die talwärts Energie.

Die mittlere Steigung der SSB "Biel-Magglingen" liegt bei 27.1 %. Die entsprechenden Kräfte sind in der Tabelle fett markiert.

3.1.2 Rollreibung Wagen

Gemäss Abschnitt 2.1.2, kann die Energie vom Rollwiderstand abgeleitet werden.

$$E_{RollWa} = \mu_{RollWa} F_N \cdot s = \mu_{RollWa} \cdot g \cdot m_{Tot} \cdot \cos(\alpha) \cdot s$$

Fallbeschleunigung:	$g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
Gesamtes Gewicht des Fahrzeugs:	$m_{Tot} = 13'790 + N_{Pers} \cdot 80 \text{ [kg]}$
Maximale Zuladung	$N_{Pers} = 120 \text{ Fahrgäste}$
Rollwiderstandskoeffizient:	$\mu_{RollWa} = 0.003 \text{ [-]}$
Länge der Strecke	$s = 1693.6 \text{ [m]}$

Die berechnete Energie ist in der Tabelle ersichtlich.

Fall	Anzahl Fahrgäste	Gesamtes Gewicht		Rollwiderstand	Energie Rollwiderstand		Rollwiderstand	Energie Rollwiderstand
	N_{Pers}	m_{Tot}	Steigung 0 [%] Winkel α 0.0 [°]	F_{RollWa}	E_{RollWa}	Steigung 15 [%] Winkel α 8.53 [°]	F_{RollWa}	E_{RollWa}
	[-]	[kg]		[kN]	[kWh]		[kN]	[kWh]
Leer	0	13'790		0.41	0.19		0.40	0.19
Halb voll	60	18'590		0.55	0.26		0.54	0.25
Voll	120	23'390		0.69	0.32		0.68	0.32
	N_{Pers}	m_{Tot}	Steigung 30 [%] Winkel α 16.7 [°]	F_{RollWa}	E_{RollWa}	Steigung 45 [%] Winkel α 24.2 [°]	F_{RollWa}	E_{RollWa}
	[-]	[kg]		[kN]	[kWh]		[kN]	[kWh]
Leer	0	13'790		0.39	0.18		0.37	0.17
Halb voll	60	18'590		0.52	0.25		0.50	0.23
Voll	120	23'390		0.66	0.31		0.63	0.30
	N_{Pers}	m_{Tot}	Steigung 60 [%] Winkel α 31.0 [°]	F_{RollWa}	E_{RollWa}	Steigung 90 [%] Winkel α 42.0 [°]	F_{RollWa}	E_{RollWa}
	[-]	[kg]		[kN]	[kWh]		[kN]	[kWh]
Leer	0	13'790		0.35	0.16		0.30	0.14
Halb voll	60	18'590		0.47	0.22		0.41	0.19
Voll	120	23'390		0.59	0.28		0.51	0.24

Tabelle 22: Energie der Rollreibung des Fahrzeuges

Die mittlere Steigung der SSB "Biel-Magglingen" liegt bei 27.1 %. Die entsprechenden Energiewerte sind in der Tabelle fett markiert.

3.1.3 Luftwiderstand

Gemäss Abschnitt 2.1.3, kann die Energie vom Luftwiderstand²¹ abgeleitet werden.

Der Wagen weist eine Frontfläche von $A_{Wa} = 3.3 \text{ m} \cdot 2.51 \text{ m} = \text{ca. } 8.3 \text{ m}^2$ auf.

$$E_{Luft} = \frac{1}{2} c_w \rho_{Luft(avg)} v^2 A_{Fz} \cdot s$$

Pendelbahn Frontfläche:

$$A_{Wa} = 8.28 \text{ [m}^2\text{]}$$

Strömungswiderstandskoeffizient:

$$c_w = 1.0 \text{ [-]}$$

Luftdichte (Mittelwert 10.5°C, 450 müM):

$$\rho_{Luft(avg)} = 1.18 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

Geschwindigkeit des Fahrzeugs (0...36 km/h)

$$v = 0 \dots 10 \text{ [m/s]}$$

Länge der Strecke

$$s = 1693.6 \text{ [m]}$$

²¹ Energie, die zur Überwindung des Luftwiderstands aufgewendet werden muss

Die berechnete Energie ist in der Tabelle ersichtlich.

Fahrgeschwindigkeit		Luftwiderstand	Energie des Luftwiderstands
v		F_{Luft}	E_{Luft}
[m/s]	[km/h]	[kN]	[kWh]
0.0	0.0	0.00	0.00
2.0	7.2	0.02	0.01
4.0	14.4	0.08	0.04
5.0	18.0	0.12	0.06
6.0	21.6	0.18	0.08
8.0	28.8	0.31	0.15
10.0	36.0	0.49	0.23

Tabelle 23: Energie des Luftwiderstandes

Im Normalfall fährt die SSB “Biel-Magglingen“ bei einer Geschwindigkeit von 4.8 m/s. Dies entspricht 80 % der Nenngeschwindigkeit. Der entsprechende Fall ist fett markiert.


3.2 ENERGIE AM ZUG- BZW. GEGENSEIL

3.2.1 Fall "Schrägaufzug"

Wie im Abschnitt 2.2.2 erläutert, variiert sich die Gewichtskraft kontinuierlich. Die gesamte Energie, welche in den beiden Fäden beinhaltet, muss mittels eines Integrals berechnet werden.

Die potenzielle Energie lautet:

$$dE_{(h)} = m_{(x)} g \cdot dh$$

Energie des Seilabschnitts L_1	Energie des Seilabschnitts L_2	
$dE_{1(x)} = m_{1(x)} \cdot g \cdot dh_{1(x)}$	$dE_{2(x)} = m_{2(x)} g \cdot dh_{2(x)}$	
Mit Gleichung		
$dE_{1(x)} = m' \cdot (x_{max} - x) \cdot g \cdot dx \cdot \sin \alpha$	$dE_{2(x)} = m' \cdot x \cdot g \cdot (-dx) \cdot \sin \alpha$	
Die gesamte Energie der beiden Fäden kann berechnet werden		
$dE_{g(x)} = dE_{1(x)} + dE_{2(x)}$		
$dE_{g(x)} = m' \cdot g \cdot \sin \alpha (x_{max} \cdot dx - xdx - xdx) = m' \cdot g \cdot \sin \alpha (x_{max} \cdot dx - 2xdx)$		
Nach Integration		
$E_{g(x)} = m' g \cdot \sin \alpha \cdot (x_{max} \cdot x - x^2)$		
Hier erkennt man eine Parabel mit einem Extremum (Maximum)		
Dieses Extremum befindet sich bei: $E_{g(max)}$, wenn: $\frac{dE_{g(x)}}{dx} = 0$		
$E_{g(x)} \frac{dE_{g(x)}}{dx} = 0: m' g \cdot \sin \alpha \cdot (x_{max} - 2x) = 0, \rightarrow x(E_{g(max)}) = \frac{x_{max}}{2}$		
Die maximale Energie kann jetzt berechnet werden		
$E_{g(x=\frac{x_{max}}{2})} = m' g \cdot \sin \alpha \cdot \left(x_{max} \cdot \frac{x_{max}}{2} - \frac{x_{max}^2}{4} \right) = \frac{1}{4} m' g \cdot \sin \alpha \cdot x_{max}^2$		
 Die beinhaltetete Energie im Seil hängt ab von: <ul style="list-style-type: none"> - Seillänge - Steigung - spezifischem Seilgewicht in kg/m 		

Gleichung 3: Energie der Seilabschnitte

Fallbeschleunigung:	g	$= 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
Spezifisches Gewicht des Zugseiles:	m'_{Zs}	$= 5.3 \text{ [kg/m]}$
Spezifisches Gewicht des Gegenseiles:	m'_{Gs}	$= 0.0 \text{ [kg/m]}$
Länge der Strecke:	x_{max}	$= 1693.6 \text{ [m]}$
Steigung (+) oder Gefälle (-):	i	$= 15...90 \text{ [%]}$
Winkel:	α	$= 8.5...42 \text{ [}^\circ\text{]}$

Die berechnete Energie ist in der Tabelle ersichtlich.

Verhältnis L_1/L_2	x/x_{\max}	[%]	0		25		50		75		100	
Seillänge L_1	x_1	[m]	1693.6		1270.2		846.8		423.4		0.0	
Seillänge L_2	x_2	[m]	0.0		423.4		846.8		1270.2		1693.6	
Fall	Steigung	Winkel	Energie des Seilabschnitts L_1 bzw. L_2		Energie des Seilabschnitts L_1 bzw. L_2		Energie des Seilabschnitts L_1 bzw. L_2		Energie des Seilabschnitts L_1 bzw. L_2		Energie des Seilabschnitts L_1 bzw. L_2	
	i	α	$E_{1(\text{auf})}$	$E_{2(\text{ab})}$	$E_{1(\text{auf})}$	$E_{2(\text{ab})}$	$E_{1(\text{auf})}$	$E_{2(\text{ab})}$	$E_{1(\text{auf})}$	$E_{2(\text{ab})}$	$E_{1(\text{auf})}$	$E_{2(\text{ab})}$
	[%]	[°]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Steigung Gefälle	15	8.53	0.0	0.0	1.3	-0.2	2.3	-0.8	2.9	-1.7	3.1	-3.1
	30	16.70	0.0	0.0	2.6	-0.4	4.5	-1.5	5.6	-3.3	6.0	-6.0
	45	24.23	0.0	0.0	3.7	-0.5	6.4	-2.1	8.0	-4.8	8.5	-8.5
	60	30.96	0.0	0.0	4.7	-0.7	8.0	-2.7	10.0	-6.0	10.7	-10.7
	90	41.99	0.0	0.0	6.1	-0.9	10.4	-3.5	13.0	-7.8	13.9	-13.9

Tabelle 24: Energie der Seilabschnitte

Beim Seilabschnitt L_1 , welcher sich verkürzt (\rightarrow bergwärts), wird die Energie positiv gezählt. In diesem Fall muss der Antriebsmotor antreiben und bezieht deshalb Leistung vom Netz.

Beim Seilabschnitt L_2 , welcher sich verlängert (\rightarrow talwärts) wird die Energie negativ gezählt. In diesem Fall muss der Antriebsmotor bremsen und speist deshalb Leistung ins Netz zurück.



Am Ende der Fahrt kompensieren sich die beiden Energiemengen. Das Zugseil ist kein Speicher!

Die mittlere Steigung der SSB "Biel-Magglingen" liegt bei 27.1 %. Die entsprechende Energie ist in der Tabelle fett markiert.

Die maximal rekuperierbare potenzielle Energie wäre in diesem Fall ca. 2.7 kWh.

3.2.2 Rollreibung Seil

Wie im Abschnitt 2.2.3 erklärt, wurde die Rollreibungskraft der Seile berechnet. Nachfolgend wird die Formel für die Energierechnung erweitert.

Fallbeschleunigung: $g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
 Spezifisches Gewicht des Zugseiles: $m'_{Zs} = 5.3 \text{ [kg/m]}$
 Spezifisches Gewicht des Gegenseiles: $m'_{Gs} = 0.0 \text{ [kg/m]}$
 Länge der Strecke: $s = 1693 \text{ [m]}$
 Rollwiderstandskoeffizient Seil: $\mu_{RollSe} = 0.03 \text{ [-]}$

$$E_{RollZs} = F_{RollZs} \cdot s = \mu_{RollSe} F_{NZs} \cdot s = \mu_{RollZs} \cdot m'_{Zs} \cdot g \cdot \cos(\alpha_{avg}) \cdot s^2$$

$$E_{RollGs} = F_{RollGs} \cdot s = \mu_{RollSe} F_{NGs} = \mu_{RollGs} \cdot m'_{Gs} \cdot g \cdot \cos(\alpha_{avg}) \cdot s^2$$

Die berechnete Energie ist in der Tabelle ersichtlich.

Steigung	Winkel	Gewicht	Rollwiderstand	Energie Rollwiderstand
i	α	m_{tZs}	F_{RollZs}	F_{RollZs}
[%]	[°]	[kg]	[kN]	[kWh]
0	0.0	8'976	2.64	1.24
15	8.5	8'976	2.61	1.23
30	16.7	8'976	2.53	1.19
45	24.2	8'976	2.41	1.13
60	31.0	8'976	2.27	1.07
90	42.0	8'976	1.96	0.92

Tabelle 25: Energie der Rollreibung der Seilabschnitte

3.3 ZUSAMMENSTELLUNG DER ENERGIEN

3.3.1 Fall "Ohne Gegenseil"

Damit die Tabelle übersichtlich bleibt, wird nur der folgende Fall berücksichtigt:

- Wagen 1 bzw. Wagen 2 halb beladen (\rightarrow d.h. 60 Fahrgäste)
- Fahrgeschwindigkeit 5.0 m/s (\rightarrow 18 km/h)
- Steigung bzw. Gefälle 30% (\rightarrow 16.7°)

Der Wagen 1 startet in der Talstation und fährt bergwärts. Die Energie am Antriebsrad ist positiv gezählt, wenn das Antriebsrad bzw. der Antriebsmotor Energie vom Netz beziehen muss.

Verhältnis L_1/L_2	x/x_{\max}	[%]	0		25		50		75		100	
Seillänge L_1	x_1	[m]	1693.6		1270.2		846.8		423.4		0.0	
Seillänge L_2	x_2	[m]	0.0		423.4		846.8		1270.2		1693.6	
			$E_{1(\text{auf})}$	$E_{2(\text{ab})}$	$E_{1(\text{auf})}$	$E_{2(\text{ab})}$	$E_{1(\text{auf})}$	$E_{2(\text{ab})}$	$E_{1(\text{auf})}$	$E_{2(\text{ab})}$	$E_{1(\text{auf})}$	$E_{2(\text{ab})}$
			[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Rollwiderstand Wagen	Halbvoll		0.00	0.00	0.06	0.06	0.12	0.12	0.18	0.18	0.25	0.25
Rollwiderstand Zugseil	$i=30\%$		0.00	0.00	0.26	0.04	0.45	0.15	0.56	0.33	0.60	0.60
Luftwiderstand	$v=5.0$ m/s		0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04	0.04	0.06	0.06
Neigung / Ge- fälle	$i=30\%$		0.0	0.0	6.2	-6.2	12.3	12.3	18.5	18.5	24.7	24.7
Gewichtskraft Zugseil	$i=30\%$		0.0	0.0	2.6	-0.4	4.5	-1.5	5.6	-3.3	6.0	-6.0
Summe pro Seilabschnitt			0.0	0.0	9.1	-6.4	17.4	-13.5	24.9	-21.3	31.5	-29.7
Summe am Antriebsrad			0.0		2.7		3.9		3.6		1.8	

Tabelle 26: Übersicht aller Energie

Alle Kräfte in Abhängigkeit der Strecke werden für die Anlage “Biel-Magglingen” graphisch dargestellt. Die Legende der verschiedenen Kurven wird tabellarisch veranschaulicht:

Name	Legende	Erklärung / Bemerkung
x-Achse	x	Fahrstrecke in Meter [m]
y-Achse	y	Energie in Kilowattstunde [kWh]
Rote Volllinie	EStGeWa1	Energie für die Steigung Wagen 1 bergwärts
Blaue Volllinie	EZs1	Energie der Gewichtskraft des Zugseiles 1 bergwärts
Rote feine Linie	$\sum E$ -Roll/Luft1Zs1	Summe der Rollreibungs- bzw. Luftwiderstand von Wagen 1 / Zugseil 1 bergwärts
Grüne Strichlinie	$\sum Wa1+Zs1$	Summe der Energien am Seilabschnitt 1 bergwärts
Orange Volllinie	EStGeWa2	Energie für das Gefälle Wagen 2 talwärts
Hellblaue Volllinie	EZs2	Energie der Gewichtskraft des Zugseiles 2 talwärts
Orange feine Linie	$\sum E$ -Roll/Luft2Zs2	Summe der Rollreibungs- bzw. Luftwiderstand von Wagen 2 / Zugseil 2 talwärts
Hellgrüne Strichlinie	$\sum Wa2+Zs2$	Summe der Energien am Seilabschnitt 2 talwärts
Schwarze Volllinie	Antriebsrad	Summe der Energien am Antriebsrad (“+” → Antreiben)

Tabelle 27: Legende zum Diagramm “Übersicht der Energie”

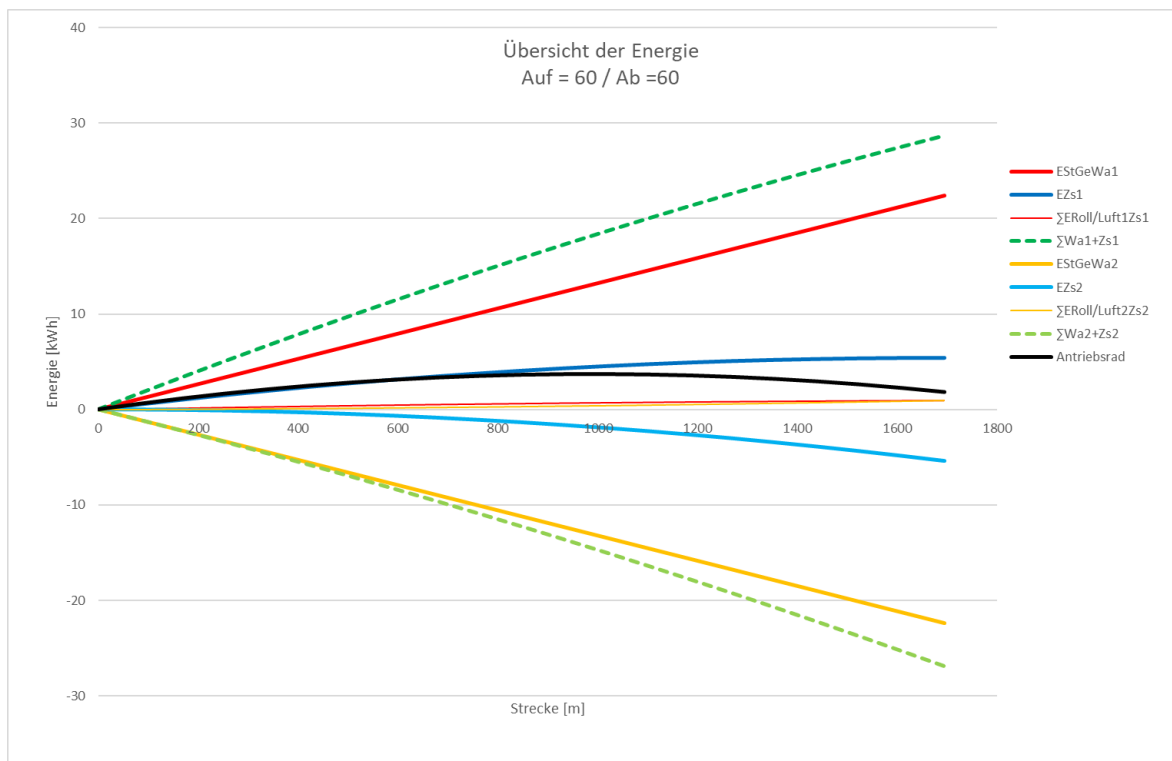


Abbildung 51: Diagramm Übersicht der Energie

Ein paar interessante Lastfälle werden für die Anlage “Biel-Magglingen” graphisch dargestellt. Die Legende der verschiedenen Kurven wird tabellarisch veranschaulicht:

Name	Legende	Erklärung / Bemerkung
x-Achse	x	Fahrstrecke in Meter [m]
y-Achse	y	Energie in Kilowattstunde [kWh]
Rote Volllinie	Fall "Auf 120 / Ab 0"	Extremfall Last bergwärts (W1 → N=120 / W2 → N=0)
Grüne Volllinie	Fall "Leer"	Fall “leer” (W1 → N=0 / W2 → N=0)
Orange Volllinie	Fall "Auf 60 / Ab 60"	Fall “Mitte” (W1 → N=60 / W2 → N=60)
Blaue Volllinie	Fall "Auf 0 / Ab 120"	Extremfall Last talwärts (W1 → N=0 / W2 → N=120)

Tabelle 28: Legende zum Diagramm “Übersicht Energie bei verschiedenen Fällen”

Wenn die Energie positiv gezählt wird, handelt es sich um Bezugsenergie vom Netz.
Im Gegenfall (→ “negativ”) handelt es um Rückspeiseenergie.

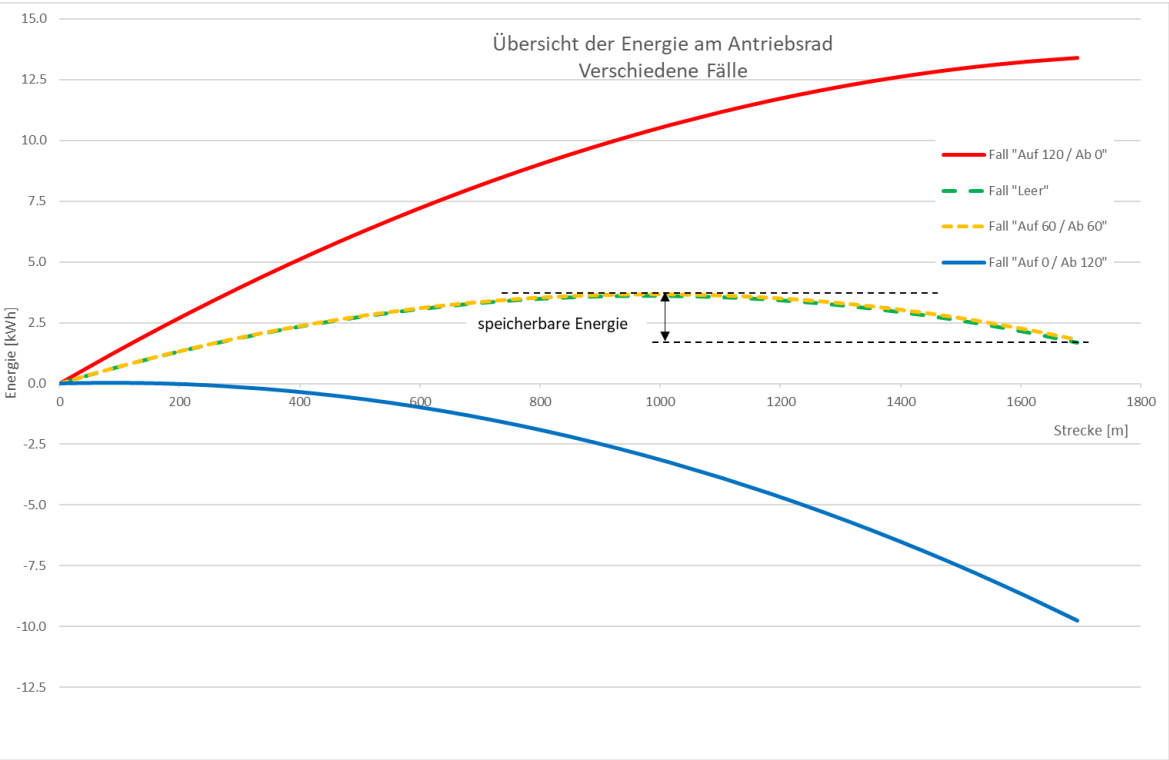


Abbildung 52: Diagramm Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen

In der Abbildung 52 wurde die speicherbare Energie bei den beiden Fällen “Leer” bzw. “Auf 60 / Ab 60” dargestellt. Ebenfalls kann auch die Energie zwischen den X-Axis und der blauen Linie des Falls “Auf 0 / Ab 120” gespeichert werden.

Anschliessend werden für die vier Fälle die Energie für eine Fahrt berechnet. Die Ergebnisse sind tabellarisch dargestellt.

Bezugsgrösse	Einheit	Fall			
		"Auf 120 / Ab 0"	"Leer"	"Auf 60 / Ab 60"	"Auf 0 / Ab 120"
Bezugsenergie	[kWh]	13.38	3.61	3.68	0.03
Rückspeiseenergie	[kWh]	0.00	1.92	1.87	9.79
Nettoenergie	[kWh]	13.38	1.68	1.81	-9.76

Tabelle 29: Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen

Je nach Fall variiert die Bezugsenergie am Antriebsrad zwischen 0.03 und 13.4 kWh. Die Rückspeiseenergie, welche theoretisch zwischengespeichert werden könnte, variiert von 0.0 bis 9.8 kWh. Im Normalfall (→ gleiche Last) liegt die speicherbare Energie im Bereich von 1.9 kWh pro Fahrt.

3.3.2 Fall "Mit Gegenseil"

Da es viele Pendelbahnen mit einem Gegenseil ausgerüstet sind, macht es Sinn die Wirkung des Gegenseiles zu überprüfen. Hier wurde das Gegenseil mit einem halbierten Durchmesser ausgewählt. Als Folge liegt sein spezifisches Gewicht bei einem Viertel des Zugseiles.

Damit die Tabelle übersichtlich bleibt, wird nur der folgende Fall berücksichtigt:

- Wagen 1 bzw. Wagen 2 halb beladen (→ d.h. 60 Fahrgäste)
- Fahrgeschwindigkeit 5.0 m/s (→ 18 km/h)
- Steigung bzw. Gefälle 30% (→ 16.7°)

Der Wagen 1 startet in der Talstation und fährt bergwärts. Die Energie am Antriebsrad ist positiv gezählt, wenn das Antriebsrad bzw. der Antriebsmotor Energie vom Netz beziehen muss.

Verhältnis L_1 / L_2	x / x_{\max}	[%]	0		25		50		75		100	
Seillänge L_1	x_1	[m]	1693.6		1270.2		846.8		423.4		0.0	
Seillänge L'_1	x'_1	[m]	0.0		423.4		846.8		1270.2		1693.6	
Seillänge L_2	x_2	[m]	0.0		423.4		846.8		1270.2		1693.6	
Seillänge L'_2	x'_2	[m]	1693.6		1270.2		846.8		423.4		0.0	
			$E_{1(auf)}$	$E_{2(ab)}$	$E_{1(auf)}$	$E_{2(ab)}$	$E_{1(auf)}$	$E_{2(ab)}$	$E_{1(auf)}$	$E_{2(ab)}$	$E_{1(auf)}$	$E_{2(ab)}$
			[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Rollwiderstand Wagen	Halbvoll		0.00	0.00	0.06	0.06	0.12	0.12	0.18	0.18	0.25	0.25
Rollwiderstand Zugseil	$i=30\%$		0.00	0.00	0.26	0.04	0.45	0.15	0.56	0.33	0.60	0.60
Rollwiderstand Gegenseil	$i=30\%$		0.00	0.00	0.01	0.07	0.04	0.11	0.08	0.14	0.15	0.15
Luftwiderstand	$v=5.0\text{ m/s}$		0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04	0.04	0.06	0.06
Neigung / Gefälle	$i=30\%$		0.0	0.0	6.2	-6.2	12.3	-12.3	18.5	-18.5	24.7	-24.7
Gewichtskraft Zugseil	$i=30\%$		0.0	0.0	2.6	-0.4	4.5	-1.5	5.6	-3.3	6.0	-6.0
Gewichtskraft Gegenseil	$i=30\%$		0.0	0.0	0.1	-0.7	0.4	-1.1	0.8	-1.4	1.5	-1.5
Summe pro Seilabschnitt			0.0	0.0	9.2	-7.0	17.8	-14.5	25.8	-22.5	33.1	-31.0
Summe am Antriebsrad			0.0		2.2		3.3		3.2		2.1	

Tabelle 30: Übersicht aller Energie mit Gegenseil

Alle Energie in Abhängigkeit der Strecke werden für eine ähnliche Anlage mit einem Gegenseil graphisch dargestellt. Die Legende der verschiedenen Kurven wird tabellarisch veranschaulicht:

Name	Legende	Erklärung / Bemerkung
x-Achse	x	Fahrstrecke in Meter [m]
y-Achse	y	Energie in Kilowattstunde [kWh]
Rote Volllinie	EStGeWa1	Energie für die Steigung Wagen 1 bergwärts
Blaue Volllinie	EZs1	Energie der Gewichtskraft des Zugseiles 1 bergwärts
Blaue Strichlinie	EGs1	Energie der Gewichtskraft des Gegenseiles 1 bergwärts
Rote feine Linie	$\sum E_{\text{Roll/Luft1}}$ Zs1Gs1	Summe der Rollreibungs- bzw. Luftwiderstand von Wagen 1 / Zugseil 1/ Gegenseil 1 bergwärts
Grüne Strichlinie	$\sum Wa1+Zs1+Gs1$	Summe der Energien am Seilabschnitt 1 bergwärts
Orange Volllinie	EStGeWa2	Energie für das Gefälle Wagen 2 talwärts
Hellblaue Volllinie	EZs2	Energie der Gewichtskraft des Zugseiles 2 talwärts
Hellblaue Strichlinie	EGs2	Energie der Gewichtskraft des Gegenseiles 2 talwärts
Orange feine Linie	$\sum E_{\text{roll/Luft2}}$ Zs2Gs2	Summe der Rollreibungs- bzw. Luftwiderstand von Wagen 2 / Zugseil 2 / Gegenseil 2 talwärts
Hellgrüne Strichlinie	$\sum Wa2+Zs2+Gs2$	Summe der Energien am Seilabschnitt 2 talwärts
Schwarze Volllinie	Antriebsrad	Summe der Energien am Antriebsrad ("+" → Antreiben)

Tabelle 31: Legende zum Diagramm "Übersicht der Energie mit Gegenseil"

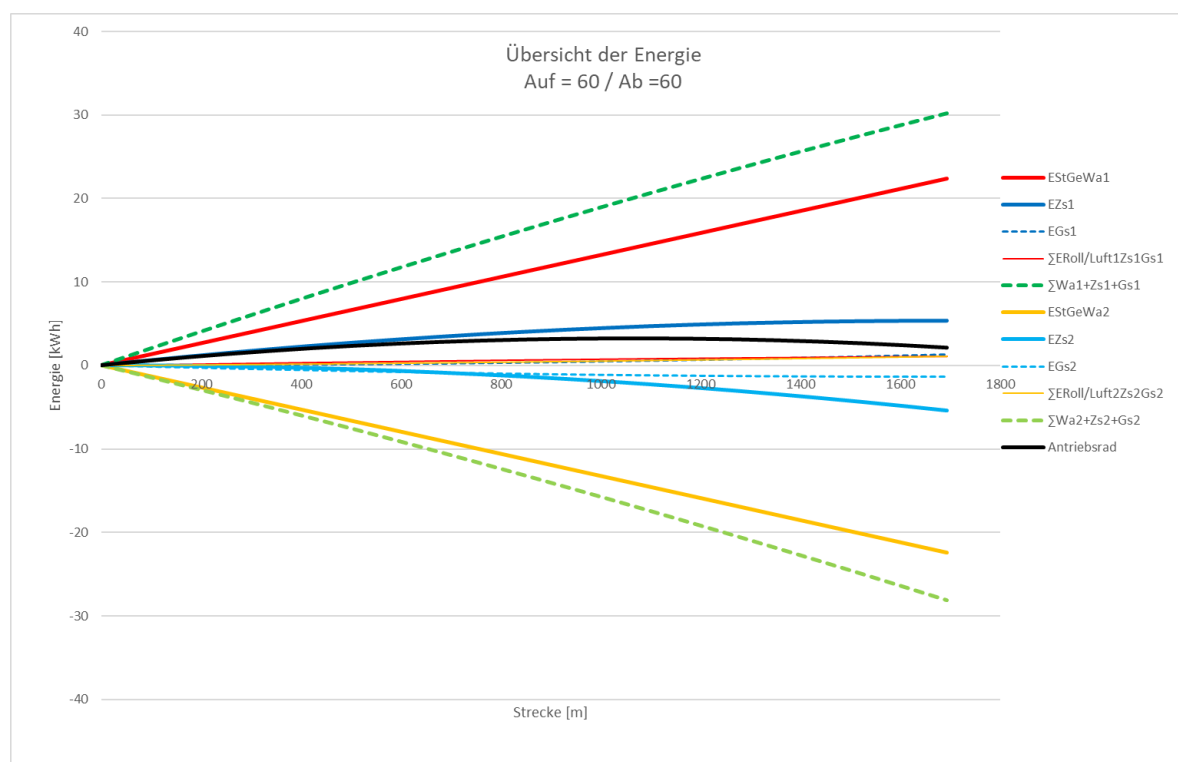


Abbildung 53: Diagramm Übersicht der Energie mit Gegenseil

Ein paar interessante Lastfälle für eine ähnliche Anlage mit einem Gegenseil sind graphisch dargestellt. Die Legende der verschiedenen Kurven wird tabellarisch veranschaulicht:

Name	Legende	Erklärung / Bemerkung
x-Achse	x	Fahrstrecke in Meter [m]
y-Achse	y	Energie in Kilowattstunde [kWh]
Rote Volllinie	Fall "Auf 120 / Ab 0"	Extremfall Last bergwärts ($W1 \rightarrow N=120$ / $W2 \rightarrow N=0$)
Grüne Volllinie	Fall "Leer"	Fall "leer" ($W1 \rightarrow N=0$ / $W2 \rightarrow N=0$)
Orange Volllinie	Fall "Auf 60 / Ab 60"	Fall "Mitte" ($W1 \rightarrow N=60$ / $W2 \rightarrow N=60$)
Blaue Volllinie	Fall "Auf 0 / Ab 120"	Extremfall Last talwärts ($W1 \rightarrow N=0$ / $W2 \rightarrow N=120$)

Tabelle 32: Legende zum Diagramm "Übersicht Energie bei verschiedenen Fällen mit Gegenseil"

Wenn die Energie positiv gezählt wird, handelt es sich um Bezugsenergie vom Netz.
Im Gegenfall (\rightarrow "negativ") handelt es um Rückspeiseenergie.

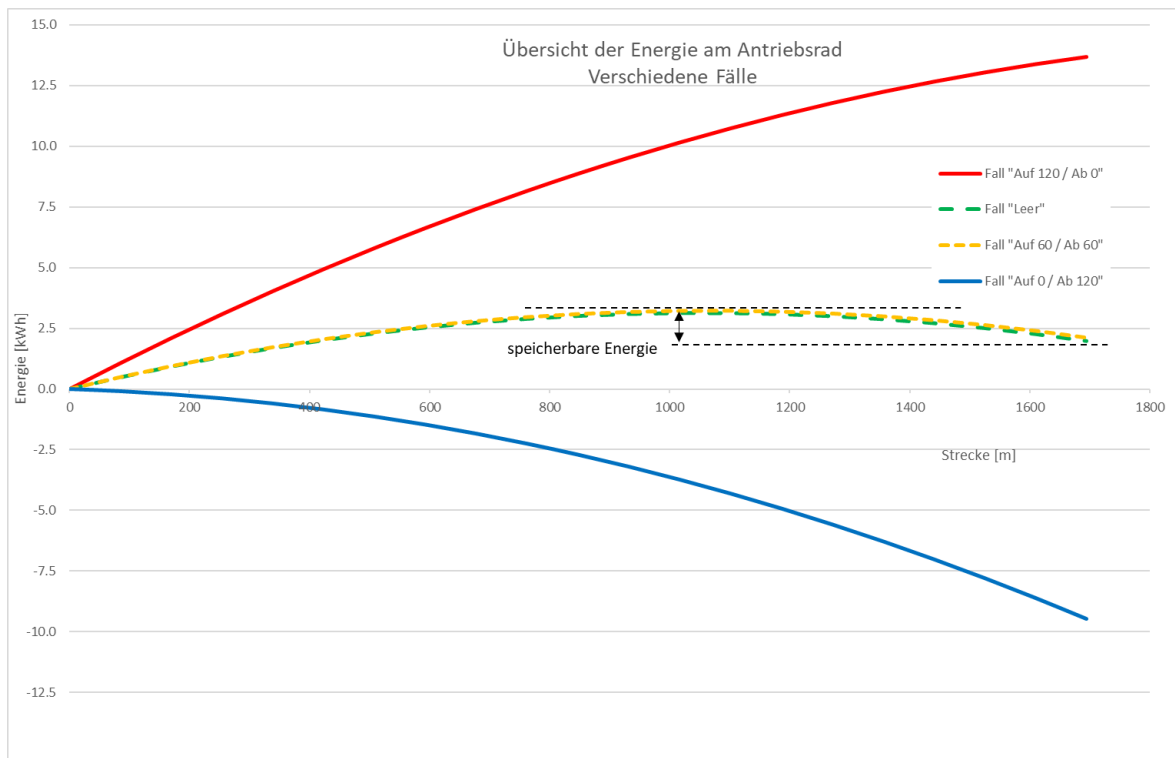


Abbildung 54: Diagramm Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen mit Gegenseil

In der Abbildung 54 wurde die speicherbare Energie bei den beiden Fällen "Leer" bzw. "Auf 60 / Ab 60" dargestellt. Ebenfalls kann auch die Energie zwischen den X-Axis und der blauen Linie des Falls "Auf 0 / Ab 120" gespeichert werden.

Anschliessend werden für die vier Fälle die Energie für eine Fahrt berechnet. Die Ergebnisse sind tabellarisch dargestellt.

Bezugsgrösse	Einheit	Fall			
		"Auf 120 / Ab 0"	"Leer"	"Auf 60 / Ab 60"	"Auf 0 / Ab 120"
Bezugsenergie	[kWh]	13.68	3.14	3.22	0.00
Rückspeiseenergie	[kWh]	0.00	1.15	1.11	9.46
Nettoenergie	[kWh]	13.68	1.98	2.11	-9.46

Tabelle 33: Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen mit Gegenseil

Je nach Fall variiert die Bezugsenergie am Antriebsrad zwischen 0.03 und 13.7 kWh. Die Rückspeiseenergie, welche theoretisch zwischengespeichert werden könnte, variiert von 0.0 bis 9.5 kWh.

Im Normalfall (→ gleiche Last) liegt die speicherbare Energie im Bereich von 1.1 kWh pro Fahrt.

Im Vergleich mit der Tabelle 29, bedeutet es eine Reduzierung von 0.76 kWh (→ $1.87 - 1.11 = 0.76$) der speicherbaren Energie beim Normalfall "Auf 60 / Ab 60". Es entspricht eine Verminderung von ca. 40% der speicherbaren Energie. Sie kommt einerseits von der Gegenseilreibung, andererseits wirkt das Gegenseil gegen das Zugseil.

3.4 ERKENNTNISSE UND ZWISCHENFAZIT

☞ Erkenntnisse

Beim Vergleich des Falls "Leer" mit dem Fall "Auf 60 / Ab 60" stellt man keinen Unterschied fest. Das ist eine wichtige Erkenntnis für die Messung der Energie.

Eine leere Fahrt ist betrieblich einfach zu organisieren.

Die Rückspeiseenergie kommt entweder von der Verlagerung des Zugseiles oder vom Lastfall. Im Gegensatz zum Lastfall steht **die Energie des Zugseiles für jede Fahrt zur Verfügung.**

Ein Gegenseil wirkt mit der Reibung und sein Eigengewicht gegen die speicherbare Energie des Zugseils. In diesem Fall ist das Verhältnis des spezifischen Gewichtes von Zugseil zum Gegenseil.

☞ Fazit

Für die Bewirtschaftung des Speichersystems ist dieser Anteil am bedeutendsten. Nicht zu vergessen sind auch die **Extremfälle, welche für die Speicherauslegung** berücksichtigt werden müssen.

4 Trägheitsmomente und Energie

4.1 EINLEITUNG

Im dem letzten Abschnitt wurde die potenzielle Energie einer Pendelbahn berechnet. Ein Anteil dieser Energie könnte gespeichert werden. In diesem Abschnitt geht es um die Berechnung der kinetischen Energie einer Pendelbahn.

Damit die schon berechnete Energie mit der kinetischen Energie der Masse bzw. Trägheit der gesamten "Schwungmasse" verglichen werden kann, muss die kinetische Energie mittels Formel bestimmt werden.

<i>Kinetische Energie: Translation</i>	<i>Kinetische Energie: Rotation</i>	
$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$	$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$	

Gleichung 4: Kinetische Energie

Danach werden die Grössenordnungen der Energie der Anlage "Biel-Magglingen" nach dem Umbau im Jahr 2019 berechnet. Damit die Werte verglichen werden können, werden dieselben Annahmen wie in den vorherigen Abschnitten getroffen:

- 60 Fahrgäste pro Wagen
- Fahrgeschwindigkeit liegt bei 6.0 m/s

Die reduzierte Masse bezieht sich auf den Wagen bzw. auf das Zugseil.

4.2 TRANSLATION

4.2.1 Wagen

Nachfolgend werden die Eckdaten der Wagen aufgelistet:

Gesamtes Gewicht des Fahrzeugs:	$m_{\text{Tot}} = 14'130 \text{ [kg]}$
Gewicht pro Person	$m_{\text{Pers}} = 80 \text{ [kg]}$
Anzahl Wagen	$N_{\text{Wa}} = 2 \text{ [-]}$
Fahrgäste pro Wagen	$N_{\text{Pers}} = 60 \text{ [-]}$

Die normale betriebliche Geschwindigkeit liegt bei 6.0 m/s:

- Gewicht $2 \times (14'1300 + 60 \times 70) = 37'860 \text{ [kg]}$
- Energie $0.5 \times 37'860 \times 6.0^2 = 681 \text{ [kJ]} \leftrightarrow 189.3 \text{ [Wh]}$
- Reduzierte Masse $37'860 \text{ [kg]}$ (\rightarrow keine Reduzierung erforderlich)

4.2.2 Zugseil

Nachfolgend sind die Eckdaten des Zugseiles angegeben:

Durchmesser des Zugseiles:	$\varnothing_{\text{Zs}} = 37 \text{ [mm]}$
Spezifisches Gewicht des Zugseiles:	$m'_{\text{Zs}} = 5.61 \text{ [kg/m]}$
Länge des Zugseiles:	$l = 1693.6 \text{ [m]}$

Da das Zugseil sich wie die beiden Wagen bewegt, liegt seine Geschwindigkeit auch bei 6.0 m/s:

- Gewicht: $5.61 \times 1693.6 = 9'501 \text{ [kg]}$
- Energie: $0.5 \times 9'501 \times 6.0^2 = 171 \text{ [kJ]} \leftrightarrow 47.5 \text{ [Wh]}$
- Reduzierte Masse: $9'501 \text{ [kg]}$ (\rightarrow keine Reduzierung erforderlich)

4.3 ROTATION

4.3.1 Antriebsräder

Laut Angaben von Doppelmayr / Garaventa (Uetendorf) werden nachfolgend die Eckdaten des Antriebsrads bzw. der Gegen- und der Ablenkscheibe aufgelistet:

Antriebsrad	2-rillig
Gegenscheibe	2-rillig
Ablenkscheibe	1-rillig
Durchmesser	3.378 [m]

Zuerst kann die Drehzahl des Antriebsrads berechnet werden:

- Drehzahl $6.0 \text{ [m/s]} / [(3.378 \text{ [m]} + 37 \text{ [mm]} / 1000) \times \pi] = 0.559 \text{ [Um/s]}$
- Drehzahl $\text{oder } 33.6 \text{ [Um/min]}$

Angabe des Massenträgheitsmoments J in $\text{kg}\cdot\text{m}^2$:

- Antriebsrad $9'840 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2]$
- Gegenscheibe $5'960 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2]$
- Ablenkscheibe $2'730 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2]$

Berechnung der Energie E , gemäss Gleichung 4 in kJ bzw. in Wh:

- Antriebsrad $9'840 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2] \times (0.559 \text{ [U/s]} \times 2\pi)^2 = 60.8 \text{ [kJ]} \leftrightarrow 16.9 \text{ [Wh]}$
- Gegenscheibe $5'960 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2] \times (0.559 \text{ [U/s]} \times 2\pi)^2 = 36.8 \text{ [kJ]} \leftrightarrow 10.2 \text{ [Wh]}$
- Ablenkscheibe $2'730 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2] \times (0.559 \text{ [U/s]} \times 2\pi)^2 = 16.9 \text{ [kJ]} \leftrightarrow 4.7 \text{ [Wh]}$

Hier muss die Rotationsenergie ($n = 0.545 \text{ U/s}$) des Antriebsrads bzw. der Scheiben in Translationsenergie ($v = 6.0 \text{ m/s}$) auf Wagenebene umgewandelt werden:

- Reduzierte Masse: $2 \times [(60.8 + 36.8 + 16.9) \text{ [kJ]} \times 1000] / (6.0)^2 = 6'356 \text{ [kg]}$

4.3.2 Motor / Getriebe

Gemäss Datenblatt von ABB gelten folgende Eckdaten:

Trägheitsmoment:	$J_{\text{Mot}} = 6.9 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2]$
Untersetzung Getriebe	$i_{\text{Getr}} = 45.155 \text{ [-]}$

Zuerst kann die Drehzahl der Motorwelle berechnet werden:

- Drehzahl $0.559 \text{ [U/s]} \times 45.155 \text{ [-]} = 25.3 \text{ [U/s]} \leftrightarrow 1'515 \text{ [U/min]}$
- Energie: $0.5 \times 6.9 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2] \times (25.3 \text{ [U/s]} \times 2\pi)^2 = 86.9 \text{ [kJ]} \leftrightarrow 24.1 \text{ [Wh]}$

Hier muss die Rotationsenergie ($n = 25.3 \text{ U/s}$) des Motorläufers in Translationsenergie ($v = 6.0 \text{ m/s}$) auf Wagenebene umgewandelt werden:

- Reduzierte Masse: $2 \times 86.9 \text{ [kJ]} \times 1000 / (6.0)^2 = 4'825 \text{ [kg]}$

Gemäss Literatur wird das Trägheitsmoment des Getriebes als einen Anteil des Trägheitsmoments des Antriebsmotors berechnet. Hier wird 30% angenommen.

Verhältnis Getriebe zum Motor: $J_{\text{Getr}}/J_{\text{Mot}} = 0.3 \text{ [-]}$

Die Werte werden von den Motorgrössen abgeleitet.

- Energie: $0.3 \times 86.9 \text{ [kJ]} = 24.7 \text{ [kJ]} \leftrightarrow 7.2 \text{ [Wh]}$

Ebenfalls kann die reduzierte Masse abgeleitet.

- Reduzierte Masse: $0.3 \times 4'825 \text{ [kg]} = 1'448 \text{ [kg]}$

4.3.3 Bremsscheibe

Die Betriebsbremse der Anlage "Biel-Magglingen" wirkt nicht auf das Antriebsrad, sondern auf eine Bremsscheibe, welche an der Motorwelle eingebaut ist. Bei einer Messung vor Ort wurden folgende Eckdaten für die Bremsscheibe festgestellt.

Stoff (Stahl)	7'850 [kg/m³]
Durchmesser Bremsscheibe	0.80 [m]
Dicke Bremsscheibe	0.057 [m]

Somit kann das Gewicht der Bremsscheibe bestimmt werden:

$$\text{Gewicht} = \pi / 4 \times (0.8 \text{ [m]})^2 \times 0.057 \text{ [m]} \times 7850 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 225 \text{ [kg]}$$

Berechnung des Massenträgheitsmoments J (\rightarrow Zylinder) in $\text{kg}\cdot\text{m}^2$:

$$\text{Trägheitsmoment} = 0.5 \times 225 \text{ [kg]} \times (0.8 \text{ [m]} / 2)^2 = 18.0 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2\text{]}$$

Berechnung der Energie E (\rightarrow Motorwelle) in kJ bzw. in Wh:

$$\text{Energie} = 0.5 \times 18.0 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2\text{]} \times (25.3 \text{ [U/s]} \times 2\pi)^2 = 226.5 \text{ [kJ]} \leftrightarrow 62.9 \text{ [Wh]}$$

Hier muss die Rotationsenergie ($n = 20.5 \text{ U/s}$) der Bremsscheibe in Translationsenergie ($v = 6.0 \text{ m/s}$) auf Wagenebene umgewandelt werden:

$$\text{Reduzierte Masse} = 2 \times 226.5 \text{ [kJ]} \times 1000 / (6.0)^2 = 12'583 \text{ [kg]}$$

4.4 ZUSAMMENSTELLUNG DER TRÄGHEITSMOMENTE

Hier werden alle Ergebnisse mit ihrem Anteil am gesamten System tabellarisch veranschaulicht

Systemanteil	Energie bei 6.0 m/s	Red. Masse	Anteil am gesamten System
	[Wh]	[kg]	[%]
Wagen + Fahrgäste	189.3	37'860	52.2
Zugseil	47.5	9'501	13.1
Antriebsrad	16.9	3'375	4.65
Gegenscheibe	10.2	2'044	2.82
Ablenkscheibe	4.7	936	1.29
Getriebe	7.2	1'448	2.0
Bremsscheibe	62.9	12'583	17.3
Antriebsmotor	24.1	4'825	6.6
Summe	362.9	72'573	100.0

Tabelle 34: Übersicht der Trägheitsmomente

Hier liegt die gesamte kinetische Energie des Systems bei 0.36 [kWh].

4.5 ERKENNTNISSE UND ZWISCHENFAZIT

Die gesamte kinetische Energie, siehe Abschnitt 4.4 ist klein (\rightarrow ca. 20%) im Vergleich zur gespeicherten Energie des Zugseiles (\rightarrow ca. 1.87 kWh, Tabelle 29). Für die Betrachtung des Speichersystems kann sie vernachlässigt werden. Im Gegensatz dazu stellt **die Energie vom Wagen und Zugseil circa zwei Drittel des gesamten Wertes dar.**

5 Leistung und Wirkungsgrad

5.1 LEISTUNG

Die Leistung lässt sich aus den schon berechneten Kräften aus Abschnitt 2 ableiten.

Im Fall einer konstanten Fahrgeschwindigkeit kann folgende Formel verwendet werden.

$$P_{(s)} = F_{(s)} \cdot v$$

Kräfte:	F	= gemäss Abschnitt 2 [N]
Fahrgeschwindigkeit	v	= 0...10 [m/s]

Bei einer Veränderung der Fahrgeschwindigkeit muss noch eine zusätzliche Leistung auf das Antriebsrad wirken. Sie kann mittels nachstehender Formel bestimmt werden.

$$P_{(s)} = m_{Red} \cdot a_{(s)} \cdot v_{(s)}$$

Reduziert Masse:	m _{Red}	= gemäss Abschnitt 4.4 [kg]
Beschleunigung / Verzögerung	a	= ± 0.15...0.5 [m/s²]

Fahrgeschwindigkeit	v	= 0...10 [m/s]
---------------------	---	----------------

Im Falle einer Beschleunigung zählt der Koeffizient a positiv. Im Falle einer Verzögerung, wird der Koeffizient a negativ betrachtet.

5.2 WIRKUNGSGRAD

Da die elektrische Energie vom Netz zum Antriebsrad mehrmals umgewandelt werden muss, müssen die Verluste in der Energiebetrachtung berücksichtigt werden. Die Umwandlungen sind hier erläutert:

- **Getriebe**
mechanische Energie Motorwelle → mechanische Energie Antriebsrad
- **Motor**
elektrische Energie Frequenzumrichter → mechanische Energie Motorwelle
- **Frequenzumrichter**
elektrische Energie vom Netz → elektrische Energie Frequenzumrichter

Laut Literatur und Datenblättern können folgende Wirkungsgrade angenommen werden:

- | | |
|---------------------|---|
| - Getriebe | $\eta_{\text{Getr}} = 0.92$ (3-stufig) |
| - Motor | $\eta_{\text{Mot}} = 0.96$ (→ 50% der Nennleistung) |
| - Frequenzumrichter | $\eta_{\text{Fu}} = 0.95$ (ISU + INU) |
| - Gesamt | $\eta_{\text{Ges}} = \eta_{\text{Getr}} \times \eta_{\text{Mo}} \times \eta_{\text{Fu}} = 0.84$ |

Wenn das Antriebsrad das System antreibt, muss die berechnete Leistung bzw. Energie des Antriebsrads durch den gesamten Wirkungsgrad dividiert werden. In unserem Fall bedeutet dies eine Zunahme von 19.2%.

Wenn das Antriebsrad das System abbremst, muss die berechnete Leistung bzw. Energie des Antriebsrads mit dem gesamten Wirkungsgrad multipliziert werden. In unserem Fall bedeutet dies eine Abnahme von 16.1%.

5.3 EINFLUSS AUF DIE ENERGIE

Wie im Abschnitt 3.3 erwähnt, wird die Tabelle 29 mit den Wirkungsgraden angepasst.

Bezugsgrösse	Einheit	Fall			
		"Auf 120 / Ab 0"	"Leer"	"Auf 60 / Ab 60"	"Auf 0 / Ab 120"
Bezugsenergie	[kWh]	15.95	4.30	4.39	0.03
Rückspeiseenergie	[kWh]	0.00	1.61	1.57	8.21
Nettoenergie	[kWh]	15.95	2.68	2.82	-8.18

Tabelle 35: Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen

Je nach Fall variiert die Bezugsenergie vom Netz von 0.03 bis zu 16.0 kWh. Die Rückspeiseenergie, welche theoretisch zwischengespeichert werden könnte, variiert von 0.0 bis 8.21 kWh.

6 Einflussfaktoren

6.1 AUFLISTUNG

Hier werden die wichtigen Faktoren, welche den Energieverbrauch bzw. die Energierückspeisung beeinflussen, aufgelistet:

- Länge der Strecke mit Neigung bzw. Höhenunterschied
- Anlage mit / ohne Gegenseil
- Spezifisches Gewicht des Zugseiles
- Reibungswiderstand des Zug- bzw. des Gegenseiles
- Reibungswiderstand der Fahrzeuge
- Wirkungsgrade des gesamten Antriebsstrangs

Anschliessend werden die Einflussfaktoren graphisch zusammengefasst.

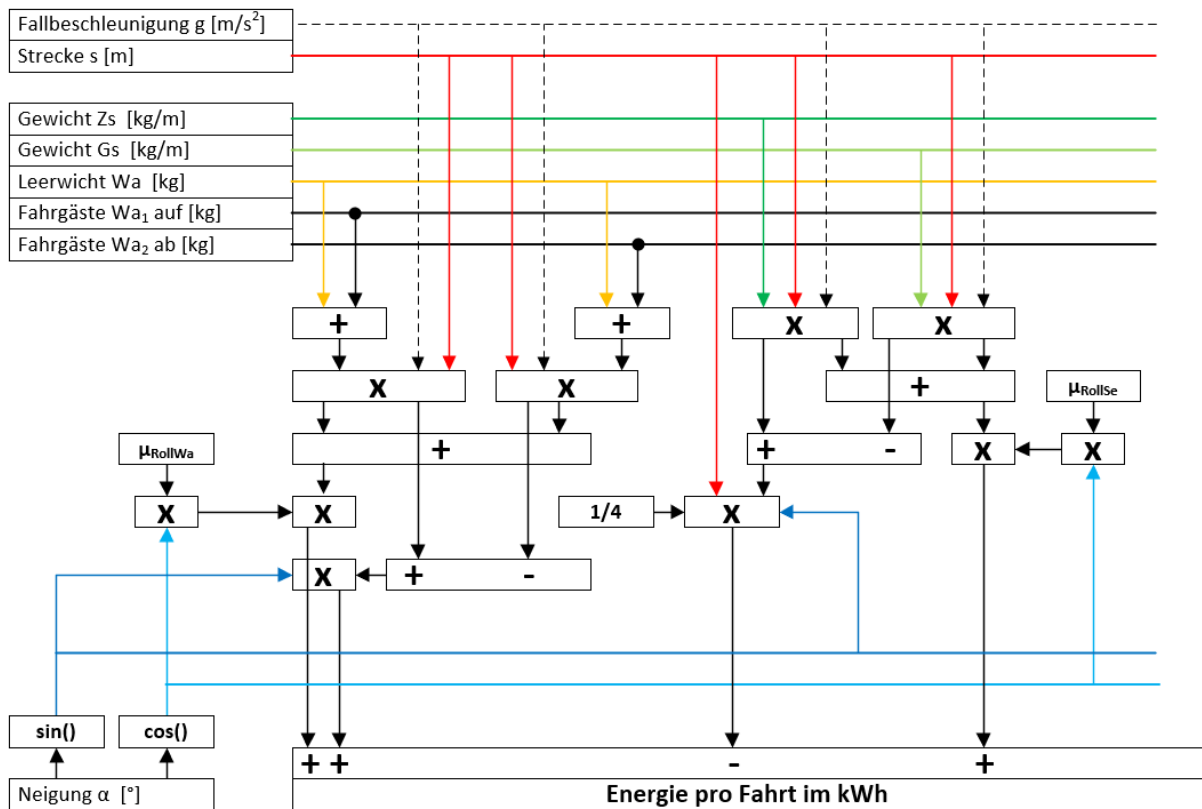


Abbildung 55: Einflussfaktoren

6.2 VERFEINERTES MODELL

Wie im Abschnitt 6 erwähnt spielt die Neigung eine wesentliche Rolle. Aus diesem Grund wurde die Strecke zuerst genauer anhand der Kundendokumentation modelliert. In einem zweiten Schritt wird die Energie mittels Excel berechnet und mit den Messungen von Juli 2017 verglichen.

6.2.1 Streckenprofil

Anhand des Kundenplans wurden 44 Punkte des Längenprofils genommen und auf 34 Schritte je 50m reduziert. Die Vereinfachung ist im nachstehenden Diagramm ersichtlich.

Die Legende zu den verschiedenen Kurven wird tabellarisch veranschaulicht:

Name	Legende	Erklärung / Bemerkung
x-Achse	x	Fahrstrecke in Meter [m]
y-Achse	y-links	Höhe [m.ü.M]
y-Achse	y-rechts	Neigung [%]
Blaue Strichlinie	Plan	Längenprofil h in [m.ü.M] gemäss Kundenplan
Blaue Dreiecke	HW1	Längenprofil h in [m.ü.M] nach der Vereinfachung
Graue Strichlinie	i	Neigung in [%] gemäss Kundenplan
Schwarze Vierecke	iW1	Neigung in [%] nach der Vereinfachung

Tabelle 36: Legende zum Diagramm "Längenprofil"

Eine positive Neigung bedeutet eine Steigung.

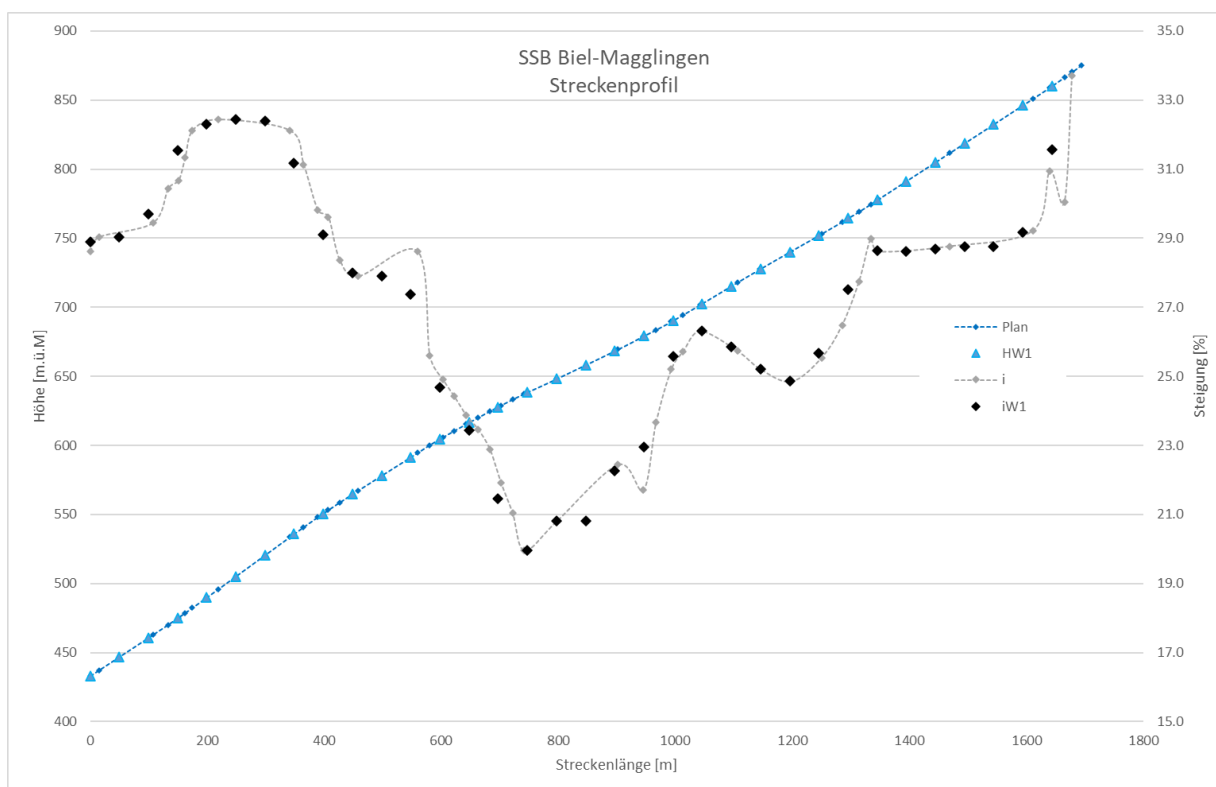


Abbildung 56: Diagramm Längenprofil

Wie im Abschnitt 8.1.2 erwähnt, wurde die mittlere Neigung 27.1% angenommen. In Wirklichkeit variiert die Neigung vom 20.0% bis zu 33.5%. Die Vereinfachung nähert sich sehr gut dem gegebenen Längenprofil.

6.2.2 Simulation anhand neues Streckenprofils

In der Simulation werden die verschiedenen Kräfte gemäss Abschnitt 2 berechnet und aufsummiert. Danach werden sie mit der gewünschten Fahrgeschwindigkeit multipliziert und die Leistung am Antriebsrad bestimmt.

Je nach Vorzeichen dieser Leistung wird der Gesamtwirkungsgrad verwendet und beeinflusst deshalb die Netzleistung.

Die Netzleistung wird mit der berechneten Fahrzeit integriert und wird je nach Vorzeichen die Netzbezugs- bzw. Netzspeiseenergie ergeben.

Anschliessend werden für vier verschiedene Fälle die Energie für eine Fahrt berechnet. Die Ergebnisse sind tabellarisch dargestellt.

Bezugsgrösse	Einheit	Fall			
		"Auf 120 / Ab 0"	"Leer"	"Auf 60 / Ab 60"	"Auf 0 / Ab 120"
Bezugsenergie	[kWh]	16.44	4.81	5.09	0.00
Rückspeiseenergie	[kWh]	0.00	1.96	2.04	8.47
Nettoenergie	[kWh]	16.44	2.85	3.06	-8.47

Tabelle 37: Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen

Je nach Fall variiert die Bezugsenergie vom Netz von 0.0 bis zu 16.4 kWh. Die Rückspeiseenergie, welche theoretisch zwischengespeichert werden könnte, variiert von 0.0 bis 8.47 kWh.

6.2.3 Vergleich mit den Messungen

Hier wird die Leistung des verfeinerten Modells mit den Messungen von Juli 2017 für verschiedene Fälle graphisch dargestellt.

Die Legende der verschiedenen Kurven wird tabellarisch veranschaulicht:

Name	Legende	Erklärung / Bemerkung
x-Achse	Strecke	Fahrstrecke in Meter [m]
y-Achse	Leistung	Nutzleistung in Kilowatt [kW]
Rote Strichlinie	Berg	Extremfall Last bergwärts (W1 → N=120 / W2 → N=0)
Rote Volllinie	Maximum	Extremfall bei den Messungen (→ 09.07.2017 um 08h15)
Rote "feine" Linie	Mittelwert +1.645σ	Obergrenze des Mittelwerts (90% der Fälle)
Grüne Strichlinie	Fall "Leer"	Fall "leer" (W1 → N=0 / W2 → N=0)
Grüne Volllinie	Mittelwert	Mittelwert bei den Messungen
Blaue "feine" Linie	Mittelwert -1.645σ	Untergrenze des Mittelwerts (90% der Fälle)
Blaue Strichlinie	Fall "Auf 0 / Ab 120"	Extremfall Last talwärts (W1 → N=0 / W2 → N=120)
Blaue Volllinie	Minimum	Extremfall bei den Messungen (→ 09.07.2017 um 16h00)

Tabelle 38: Legende zum Diagramm "Übersicht der Leistungen bei verschiedenen Fällen"

Wenn die Leistung positiv gezählt wird, handelt es sich um Bezugsleistung vom Netz.
Im Gegenfall (→ "negativ") handelt es sich um Rückspeiseleistung.

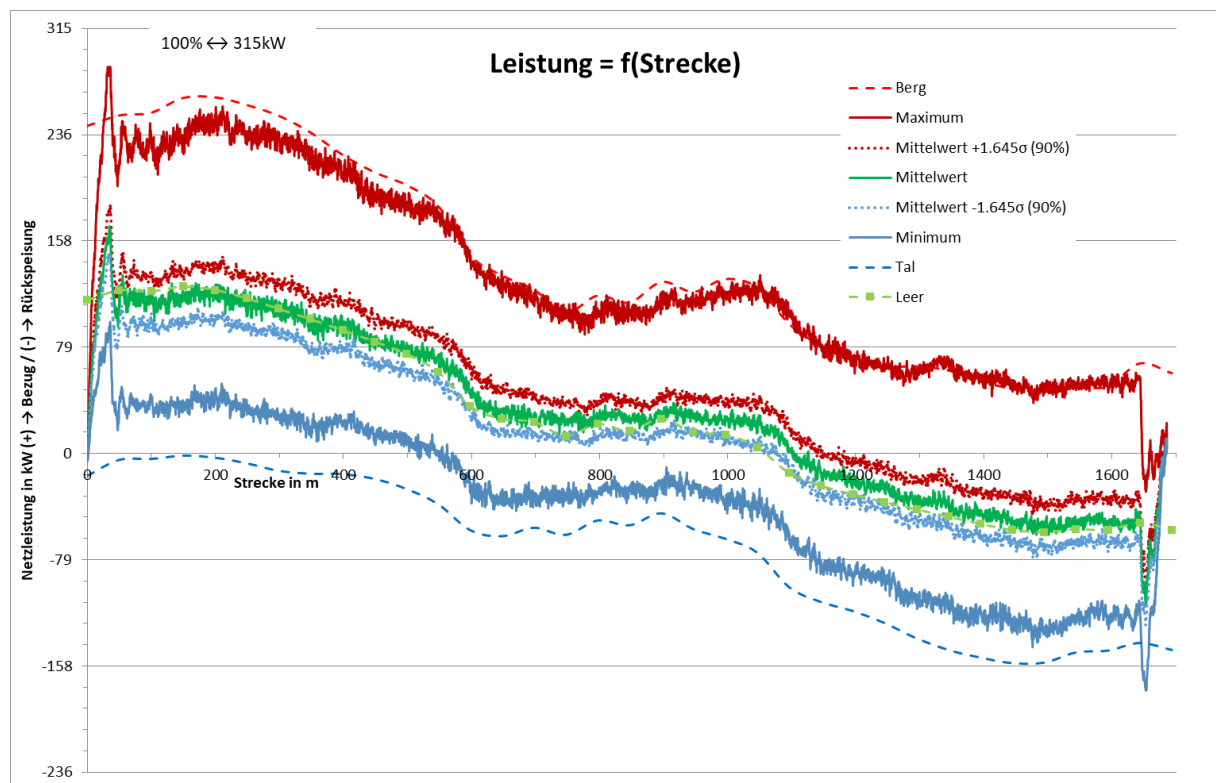


Abbildung 57: Diagramm Vergleich der Leistungen bei verschiedenen Fällen

Im Diagramm stimmen die Messwerte, ausser dem Fall “Tal / Minimum”, sehr gut mit den Simulationswerten überein.

Im nachfolgenden Diagramm wird die abgeleitete Energie graphisch dargestellt.

Die Legende der verschiedenen Kurven wird tabellarisch veranschaulicht:

Name	Legende	Erklärung / Bemerkung
x-Achse	Strecke	Fahrstrecke in Meter [m]
y-Achse	Energie	Energie in Kilowattstunde [kWh]
Rote Volllinie		Extremfall Last bergwärts (W1 → N=120 / W2 → N=0)
Grüne Volllinie	Fall "Leer"	Fall “leer” (W1 → N=0 / W2 → N=0)
Orange Volllinie	Fall "Auf 60 / Ab 60"	Fall “Mitte” (W1 → N=60 / W2 → N=60)
Blaue Volllinie	Fall "Auf 0 / Ab 120"	Extremfall Last talwärts (W1 → N=0 / W2 → N=120)

Tabelle 39: Legende zum Diagramm “Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen”

Wenn die Energie positiv gezählt wird, handelt es sich um Bezugsenergie vom Netz.
Im Gegenfall (→ “negativ”) handelt es um Rückspeiseenergie.

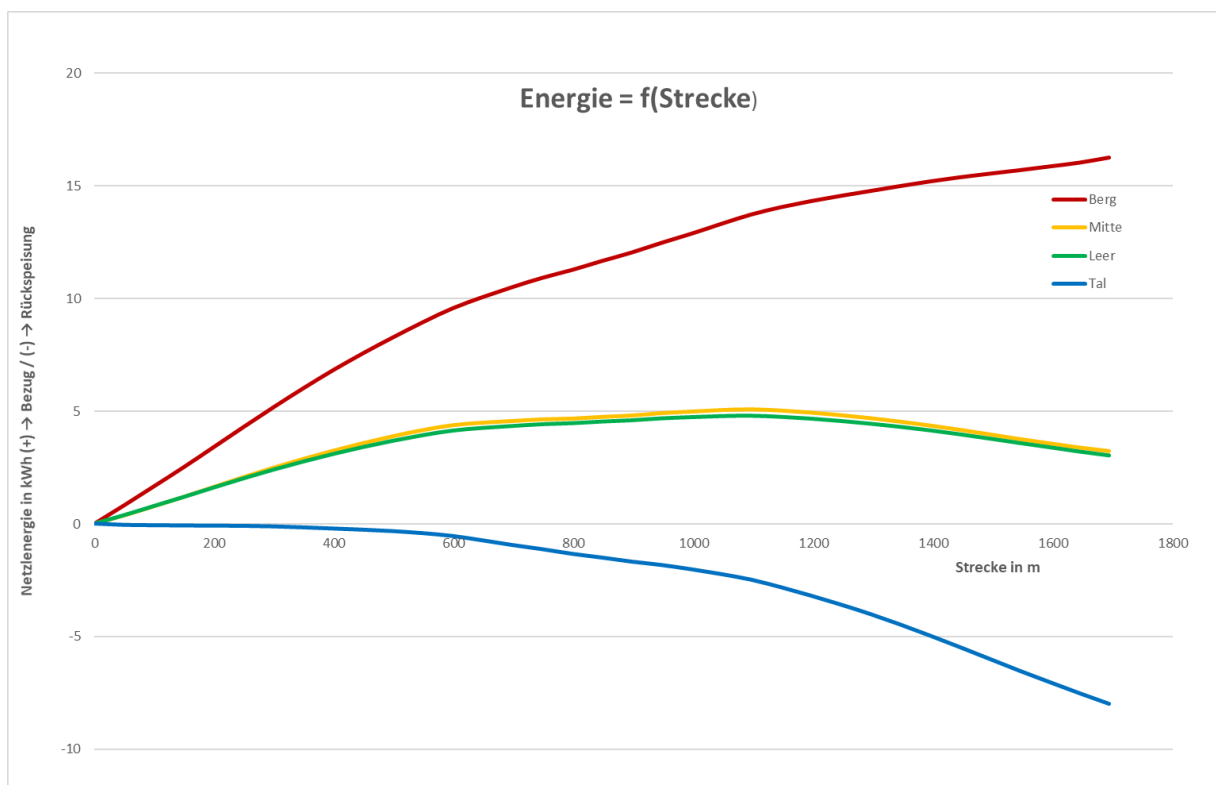


Abbildung 58: Diagramm Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen

Wie schon im Abschnitt 3.4, stellt man keinen Unterschied fest. Das ist eine wichtige Erkenntnis für die Messung der Energie. Eine leere Fahrt ergibt sehr gute Information bezüglich der speicherbaren Energie einer Standseilbahn.

6.2.4 Vergleich mit dem vereinfachten Modell

Hier werden die Messwerte, die berechnete Werte anhand des einfachen Modells sowie die Simulationenwerte tabellarisch dargestellt.

Bezugsgrösse	Einheit	Fall			
		"Auf 120 / Ab 0"	"Leer"	"Auf 60 / Ab 60"	"Auf 0 / Ab 120"
Bezugsenergie	[kWh]				
Modell einfach		15.95	4.30	4.39	0.03
Simulation		16.44	4.81	5.09	0.00
Messwerte		15.28	5.10 (σ=0.76)	xxx	1.17
Rückspeiseenergie	[kWh]				
Modell einfach		0.00	1.61	1.57	8.21
Simulation		0.00	1.96	2.04	8.47
Messwerte		0.03	1.64 (σ=0.36)	xxx	5.58
Nettoenergie	[kWh]				
Modell einfach		15.95	2.68	2.82	-8.18
Simulation		16.44	2.85	3.06	-8.47
Messwerte		15.25	3.46	xxx	-4.41

Tabelle 40: Übersicht der Energie bei verschiedenen Fällen

Für die Messwerte des Lastfalles "Leer" wurde noch die Standardabweichung eingefügt. Dies ergibt eine gute Grösse für die Genauigkeit der Messwerte.

In der Tabelle stimmen die Messwerte, ausser dem Fall "Tal", mit den Simulationenwerten gut überein. ($\rightarrow <10\%$ für die Bezugsenergie, $<20\%$ für die Rückspeiseenergie). Die Werte liegen im Bereich der Standardabweichung.

Im Fall "Leer" bedeutet dies, dass der Fall "Auf 0 / Ab 120" während der Messung niemals stattgefunden hat. Die Fälle **der Simulationen sind Extremfälle, die in der Wirklichkeit sehr selten auftreten**. Eine Verfeinerung des Modells und dessen Parameter verlangt spezielle Messfahrten mit einer genaueren Messung der Zuladung. Dies könnte während der Bremsproben erfolgen.

Im Gelb markiert sind die relevanten Daten für die Auslegung des Speichers.

7 Auslegung des Speichersystems

7.1 ECKDATEN

Gemäss vorherigem Abschnitt sind die Eckdaten auf Basis der Simulationswerte nachfolgend aufgelistet:

Maximale Bezugsenergie	$E_{\text{BergMax}} = +16.44 \text{ [kWh]}$	→ Fall "Auf 120 / Ab 0"
Maximale Rückspeiseenergie	$E_{\text{TalMin}} = -8.47 \text{ [kWh]}$	→ Fall "Auf 0 / Ab 120"
Mittlere Rückspeiseenergie	$E_{\text{LeerMin}} = -1.96 \text{ [kWh]}$	→ Fall "Leer"
Mittlere Nettoenergie	$E_{\text{LeerNetto}} = +2.85 \text{ [kWh]}$	→ Fall "Leer"

7.2 ANFORDERUNG DES SPEICHERS: ENERGIETEIL

Der Speicher muss folgende Aufgaben erfüllen können:

1. Komplette Notfahrt bergwärts
2. Genügend Kapazität für die mittlere Rückspeiseenergie
3. Falls der Extremfall "Auf 120 / Ab 0" einmal pro Tag eintritt muss der Speicher die Bezugsenergie kompensieren, sodass es keine zusätzliche Spitzenleistung auftritt
4. Genügend Kapazität für den Extremfall "Ab 120 / Auf 0"
5. Diese Anforderungen müssen bis zum Ende der Lebensdauer des Speichers gewährleistet sein

Anforderung des Punktes 1: Der Speicher braucht eine Kapazität von E_{BergMax} .
16.44 [kWh] für die Notfahrt

Anforderung des Punktes 2: Der Speicher braucht eine Kapazität von E_{LeerMin} .
1.96 [kWh] für eine durchschnittliche Fahrt

Die Anforderung des Punktes 3 benötigen ein paar Berechnungen. Einerseits muss diese Anlage eine Fahrt pro 15' leisten, andererseits wird die maximale Leistung pro 15' berechnet. Das heisst, dass die durchschnittliche Energie pro Fahrt bei 2.85 kWh liegt. In diesem Fall muss der Speicher die fehlende Energie kompensieren: $E_{\text{BergMax}} - E_{\text{LeerNetto}} = 16.44 - 2.85 = 13.59 \text{ [kWh]}$
13.59 [kWh] für den Extremfall "Berg"

Anforderung des Punktes 4: Der Speicher braucht eine Kapazität von E_{TalMin}
8.47 [kWh] für den Extremfall "Tal"

Die Anforderung des Punktes 5 benötigen wiederum ein paar Berechnungen. Laut den vorherigen Anforderungen muss der Speicher eine Kapazität von 40.46 kWh haben. Am Ende der Lebensdauer beträgt die Kapazität nur noch 80% der Nennkapazität. Dies bedeutet eine zusätzliche Kapazität von 25% oder +10.12 kWh.
10.2 [kWh] für die Lebensdauer.

☞ Insgesamt muss der Speicher über eine minimale Kapazität von **50.6 [kWh]** verfügen.

7.3 ANFORDERUNG DES SPEICHERS: LEISTUNGSTEIL

Anforderung des Punktes 1: Der Notantrieb besitzt eine Leistung von 55 kW.
Entladeleistung +55 [kW] für die Notfahrt.

Anforderung des Punktes 2: Bei der betrieblichen Fahrgeschwindigkeit von 4.1 m/s muss die vorgespeicherte Energie von 1.96 kWh über die ersten 600 m der Strecke entladen werden.
Die Zeit beträgt $600 \text{ [m]} / 4.1 \text{ [m/s]} = 146 \text{ [s]}$. Die Entladeleistung liegt in diesem Fall bei:
 $1.96 \text{ [kWh]} \times 3600 / 146 \text{ [s]} = +48 \text{ [kW]}$

Während der zweiten Hälfte der Strecke (von 1100 bis 1600, siehe Abbildung 57) muss der Speicher die Rückspeiseleistung aufnehmen. Hier beträgt die Zeit $500 \text{ [m]} / 4.1 \text{ [m/s]} = 122 \text{ [s]}$. Die Ladeleistung liegt in diesem Fall bei: $1.96 \text{ [kWh]} \times 3600 / 122 \text{ [s]} = -58 \text{ [kW]}$
Entladeleistung +48 [kW] für die durchschnittliche Fahrt
Ladeleistung -58 [kW] für die durchschnittliche Fahrt

Anforderung des Punktes 3: In diesem Fall kann die Energie des Speichers während einer ganzen Fahrt entladen werden. Laut der Machbarkeitsstudie beträgt die Fahrzeit 480 [s]. Die Entladeleistung liegt in diesem Fall bei: $13.59 \text{ [kWh]} \times 3600 / 480 \text{ [s]} = +101.9 \text{ [kW]}$
Entladeleistung +102 [kW] für den Extremfall "Berg"

Anforderung des Punktes 4: In diesem Fall muss die Energie des Speichers während einer ganzen Fahrt aufgeladen werden. Laut der Machbarkeitsstudie beträgt die Fahrzeit 480 [s]. Die Ladeleistung liegt in diesem Fall bei: $-8.47 \text{ [kWh]} \times 3600 / 480 \text{ [s]} = -63.5 \text{ [kW]}$
Ladeleistung -63.5 [kW] für den Extremfall "Tal"

Anforderung des Punktes 5: Hier gibt es keine Anforderung an die Leistung

☞ Gemäss obigen Berechnungen liegt die:

- **Entladeleistung +102 [kW]**
- **Ladeleistung -63.5 [kW]**

7.4 WAHL DES SPEICHERS

Gemäss Abschnitt 7.2 muss der Speicher eine minimale Kapazität von 48.6 kWh aufweisen. Laut Abschnitt 7.3 betragen die Entladeleistung +102 kW und die Ladeleistung -63.5 kW.

Aus strategischen Gründen wurden bei diesem Pilotprojekt die ABB-Komponenten der neuen Baureihe "PQStorI" ausgewählt. Hier stehen 2 Varianten zur Verfügung:

Variante 2C-Batterien

- Speicherkapazität: 57kWh 9 Module je 81.4V / 78Ah in Reihenschaltung
- Netzumrichter 120kW 4 Module je 30kW

Variante 1C-Batterie

- Speicherkapazität: 68kWh 9 Module je 81.4V / 94Ah in Reihenschaltung
- Netzumrichter 60kW 2 Module je 30kW

☞ Ein leistungsfähiges Speichersystem (→ 2C-system) erlaubt höhere Entlade- bzw. Ladeleistung. Das 2C-Speichersystem ermöglicht alle vorgesehenen Anforderungen. Zudem könnte das 2C-Speichersystem besser bewirtschaftet werden.

Da die Lieferzeit für die Variante "2C-Batterien" zu lang war, wurde die "1C-Variante" umgesetzt. Diese Variante kann zwar nicht alle Anforderungen an der Leistung abdecken, dafür steht mehr Energie zur Verfügung. Das hat Vorteile für die künftige Anbindung der PV-Anlage.

8 Anhang


8.1 ANLAGE

Die untenstehenden Anlagedaten stammen aus der Standseilbahn "Biel-Magglingen" vor dem Umbau im Sommer 2019. Im Fall von Abweichungen werden die neuen Anlagedaten "ab 2019" kursiv formatiert.

8.1.1 Eckdaten

<http://standseilbahnen.ch/biel-magglingen.html>

Talstation:	Biel/Bienne Seevorstadt 21 (435 m)	Karte anzeigen
Bergstation:	Magglingen Hauptstr. 241 (873 m)	Karte anzeigen
Länge:	1681 m	
Anlage:	1887 Standseilbahn, Wasserballast, Zahnstange Riggenbach 1923 Standseilbahn mit Ausweiche, Antrieb in der Bergstation	
Eröffnung:	02.06.1887	
Stilllegung:	in Betrieb	
Verwendung:	öffentlicher Verkehr	
Video:	Video Talfahrt	
Link:	Verkehrsbetriebe Biel Magglingenbahn	



Nominale Geschwindigkeit (100%)	6.0 m/s → 21.6 km/h @ 1473 Upm bis 2019
<i>Nominale Geschwindigkeit (100%)</i>	<i>6.0 m/s → 21.6 km/h @ 1515 Upm ab 2019</i>

Betriebsgeschwindigkeit (80%)	4.8 m/s → 17.3 km/h @ 1178 Upm bis 2019
<i>Betriebsgeschwindigkeit (100%)</i>	<i>6.0 m/s → 21.6 km/h @ 1515 Upm ab 2019</i>

Max. Geschwindigkeit (120%)	7.2 m/s → 25.9 km/h @ 1768 Upm bis 2019
<i>Max. Geschwindigkeit (120%)</i>	<i>7.2 m/s → 25.9 km/h @ 1818 Upm ab 2019</i>

8.1.2 Strecke

Höhenunterschied	$\Delta h = \Delta y = 442.3 \text{ m}$
Horizontale Länge	$\Delta x = 1681 \text{ m}$
Länge bzw. Strecke	$s = 1693.6 \text{ m}$
Mittlere Neigung	$15.14^\circ \rightarrow 27.06\%$
<i>Gemäss Längenprofil vom Kunden</i>	

8.1.3 Zugseil

Durchmesser Ø	37 mm
Spezifisches Gewicht	ca. 5.3 kg/m bis 2019
<i>Spezifisches Gewicht</i>	<i>ca. 5.61 kg/m ab 2019</i>

8.1.4 Wagen

Hersteller	Gangloff AG
Leergewicht	13'790 kg bis 2019
<i>Leergewicht</i>	<i>14'130 kg ab 2019</i>
Nutzlast	9'600 kg oder 120 Fahrgäste je 80 kg
Neigung	$17.223^\circ \rightarrow 31.0\%$

8.1.5 Hauptantrieb

Hauptmotor

Hersteller / Typ	ABB M2BP 355 SMA4
Nominale Spannung	3x400 V
Nominale Leistung	315 kW
Nominaler Strom	545A
Leistungsfaktor, $\cos\varphi$	0.87
Nominale Drehzahl	1488 Upm
Nominales Drehmoment	2022 Nm @100%

8.1.6 Speichersystem ab Sommer 2019

Batteriemodule

Hersteller	SDI-Samsung
Lieferant	ABB
Typ	M2f
Technologie	Li-Ion: NMC
Nominale Spannung	80.96 V
Spannung Min. /Max.	70.4...91.3 V
Kapazität	94 Ah
Energie	7.6 kWh
Lade- / Entladeleistung	1C / 1C
Gewicht	54 kg

Batterie Rack

Aufbau	1P9S
Nominale Spannung	728.6 V
Spannung Min. /Max.	633.6...821.7V
Energie	68.5 kWh

Umrichter

Lieferant	ABB
Typ	PQStorI – M (→ Module)
Technologie	3-Level Umrichter
DC- Spannung	650...830 VDC
AC-Spannung	3 x 208...415 VAC
AC-Strom	40 A
AC-Leistung	30 kW
Rack-Aufbau	3 Module: 2 in Parallelbetrieb und 1 als Reserve
Funktionen	Netz- bzw. Inselbetrieb sowie schwarzstartfähig