



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

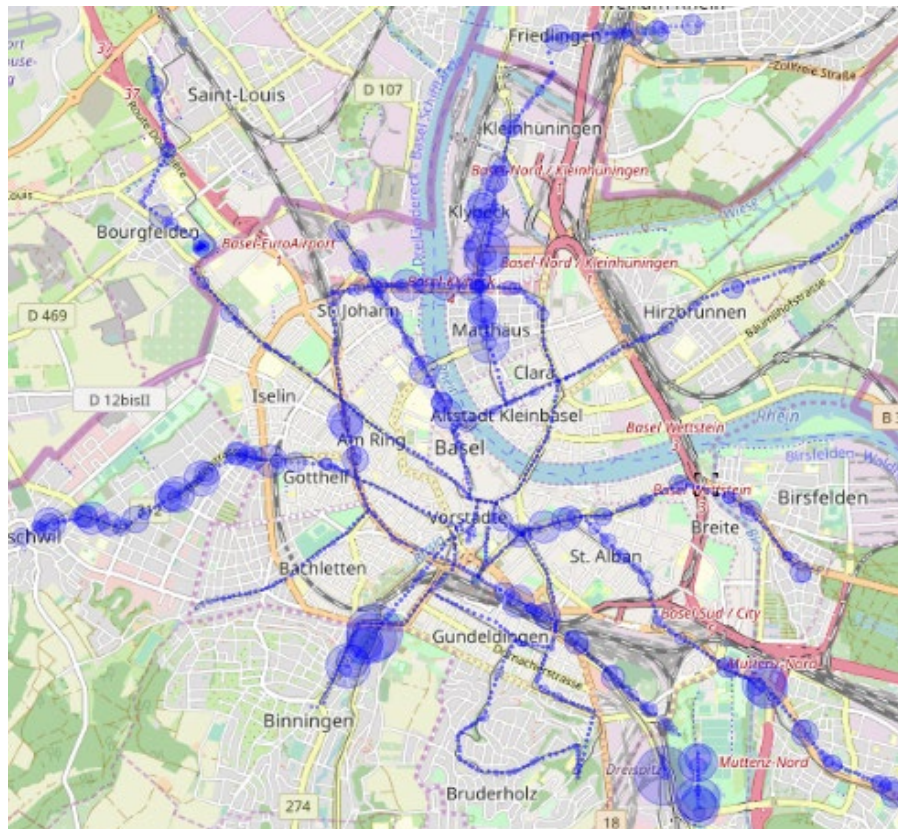
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

P-167 Nutzung von Rekuperationsenergie im BVB-Netz

Schlussbericht

Yves Flückiger, Basler Verkehrs-Betriebe

Münchensteinerstrasse 87, 4052 Basel, yves.flueckiger@bvb.ch, www.bvb.ch



Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

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

CH-3003 Bern

Programmleiter

Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 167

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.

Basel, den [30.06.2020]

Inhalt

Executive Summary in Deutsch	1
Résumé en français	1
Executive Summary in English.....	2
Zusammenfassung in Deutsch.....	2
Résumé en français	2
Bericht Enotrac.....	5

Executive Summary in Deutsch

Das Ziel vorliegender Studie war, das Potential diverser Massnahmen zur Reduktion der ungenutzten Bremsenergie im Traktionsstromversorgungsnetz der Basler Verkehrs-Betriebe (BVB) zu quantifizieren. Obschon der Fokus klar auf der technischen Seite lag, wurde auch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt, welche der BVB zusätzlich als Grundlage für die zukünftige Strategie zum Thema Energieeffizienz dienen soll.

In einem ersten Durchgang wurde der Nutzen von potenziellen Energiesparmassnahmen simulatorisch untersucht und die Ergebnisse einander gegenübergestellt. Basierend auf den Ergebnissen aus der ersten Simulationsreihe wurden gemeinsam mit der BVB weitere Massnahmen definiert. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass wohl an einigen Stellen im BVB-Netz durch die einseitigen Speisungen die Veranschaulichung zu gering ist, um die Bremsenergie durch andere Fahrzeuge zu nutzen. Daher wurde zusätzlich untersucht, momentan eher „isolierte“ Abschnitte mittels Schalthandlungen über neue 2-seitige Sektorspeisungen zusammenzuschalten.

Es wurden dabei fünf spezifische Speisegebiete definiert, welche in einem zweiten Durchgang wiederum mittels FABEL-Simulationen überprüft wurden. Als Speisegebiet wird dabei ein Netzbereich bezeichnet, in welchem Speiseabschnitte explizit zusammengeschaltet sind. Dies bewirkt einerseits, dass in diesem Gebiet mehr Fahrzeuge die anfallende Bremsenergie nutzen können und andererseits, dass auch der Einflussbereich einer möglichen stationären Massnahme (Wechselrichter oder Energiespeicher) vergrössert werden kann. Zusätzlich wurde also für jedes Speisegebiet jeweils auch eine Simulation mit Einsatz eines Wechselrichters durchgeführt. Weiter wurde mit Simulationen der Nutzen einer möglichen Gesamtlösung berechnet, in welcher die Kombination der untersuchten Speisegebiete, zwei Wechselrichter sowie die Massnahme „Erhöhung der Bremsspannung“ berücksichtigt ist.

Jede der überprüften Massnahmen zeigte sich positiv auf die Thematik der Energieeinsparung. Jedoch war nicht jede Massnahme gleich effizient bzw. wirtschaftlich. Die grösste Energieeinsparung mit nahezu 3'000MWh würde der «mobile Energiespeicher» bewirken, eine Nachrüstung der aktuellen Fahrzeugflotte ist aber nicht wirtschaftlich (Payback > 50Jahre). Kosten-Nutzen-Sieger ist die Massnahme «Zusammenschalten von Speisesektoren» mit bis zu 1'100MWh und einem geschätzten Aufwand von <10'000CHF.

Résumé en français

L'objectif de cette étude était de quantifier le potentiel de diverses mesures visant à réduire l'énergie de freinage non utilisée dans le réseau d'alimentation en énergie de traction de la Basler Verkehrs-Betriebe (BVB). Bien que l'accent ait été clairement mis sur l'aspect technique, une étude de faisabilité économique a également été réalisée, que le BVB utilisera également comme base pour sa future stratégie en matière d'efficacité énergétique.

Dans un premier temps, les avantages des mesures d'économie d'énergie potentielles ont été examinés de manière simulateur et les résultats ont été comparés. Sur la base des résultats de la première série de simulations, d'autres mesures ont été définies en collaboration avec la BVB. Les résultats ont montré qu'à certains points du réseau BVB, le maillage est probablement trop petit en raison des alimentations unilatérales pour que l'énergie de freinage puisse être utilisée par d'autres véhicules. Pour cette raison, une enquête supplémentaire a été menée sur la possibilité d'interconnecter des sections actuellement plutôt "isolées" au moyen d'opérations de commutation via de nouvelles alimentations sectorielles bilatérales.

Cinq zones d'alimentation spécifiques ont été définies, qui ont été vérifiées à nouveau lors d'un second passage au moyen de simulations FABEL. Une zone d'alimentation est une zone de réseau dans laquelle les sections d'alimentation sont explicitement interconnectées. Cela signifie, d'une part, que davantage de véhicules peuvent utiliser l'énergie de freinage générée dans cette zone et, d'autre part, que la zone d'influence d'une éventuelle mesure stationnaire (onduleur ou stockage d'énergie) peut être augmentée. De plus, une simulation avec l'utilisation d'un onduleur a été réalisée pour chaque zone d'alimentation. En outre, des simulations ont été utilisées pour calculer l'avantage d'une éventuelle solution globale, dans laquelle la combinaison des zones d'alimentation examinées, deux onduleurs ainsi que la mesure "augmentation de la tension de freinage" est prise en compte.

Chacune des mesures examinées a montré un effet positif sur le thème des économies d'énergie. Cependant, toutes les mesures n'ont pas été aussi efficaces ou économiques. La plus grande économie d'énergie, près de 3'000 MWh, serait réalisée grâce à l'"unité mobile de stockage d'énergie", mais la modernisation du parc automobile actuel n'est pas économique (délai de récupération > 50 ans). La mesure la plus rentable est la mesure "Interconnexion des secteurs alimentaires", avec un maximum de 1'100 MWh et un coût estimé à <10'000 CHF.

Executive Summary in English

The aim of this study was to quantify the potential of various measures to reduce unused braking energy in the traction power supply network of Basler Verkehrs-Betriebe (BVB). Although the focus was clearly on the technical side, an economic feasibility study was also carried out, which BVB will also use as a basis for its future strategy on energy efficiency.

In a first round, the benefits of potential energy-saving measures were examined in a simulatory manner and the results were compared. Based on the results of the first series of simulations, further measures were defined together with BVB. The results have shown that at some points in the BVB network the meshing is probably too small due to the one-sided feeds in order to use the braking energy by other vehicles. For this reason, an additional investigation was made into the possibility of interconnecting currently rather "isolated" sections by means of switching operations via new two-sided sector feeds.

Five specific feeding areas were defined, which were checked again in a second pass by means of FABEL simulations. A feed area is a network area in which feed sections are explicitly interconnected. On the one hand, this means that more vehicles can use the braking energy generated in this area and, on the other hand, that the area of influence of a possible stationary measure (inverter or energy storage) can be increased. In addition, a simulation with the use of an inverter was carried out for each feeding area. Furthermore, simulations were used to calculate the benefit of a possible overall solution, in which the combination of the examined feeding areas, two inverters as well as the measure "increase of the braking voltage" is considered.

Each of the examined measures showed a positive effect on the topic of energy saving. However, not every measure was equally efficient or economical. The greatest energy saving, almost 3'000 MWh, would be achieved by the "mobile energy storage unit", but retrofitting the current vehicle fleet is not economical (payback > 50 years). The cost-benefit winner is the measure "Interconnection of feeding areas" with up to 1'100 MWh and an estimated cost of <10'000 CHF.

Zusammenfassung in Deutsch

Siehe Seiten 13-16 Bericht Enotrac

Résumé en français

L'objectif de cette étude était de quantifier le potentiel de diverses mesures visant à réduire l'énergie de freinage inutilisée dans le réseau d'alimentation électrique de traction du BVB. Bien que l'accent ait été clairement mis sur l'aspect technique, une étude de faisabilité économique a également été réalisée, que BVB utilisera également comme base pour sa future stratégie en matière d'efficacité énergétique.

Dans un premier temps, les avantages des mesures potentielles d'économie d'énergie ont été simulés et les résultats comparés. Les résultats de la première série de simulations ainsi que l'analyse économique simple (période de remboursement) sont résumés dans le tableau qui suit.

	Mesures					
	Augmentation la tension du frein	Augmentation de la tension nominale	Stockage mobile de l'énergie	120mm ² Feeder	Stockage de l'énergie Voltastrasse	Onduleur Voltastrasse
Estimation des coûts d'acquisition, d'installation et d'intégration [1000 CHF]	100	1200	14600	7300	280	430
Coûts de maintenance [1000 CHF/an]	0	0	89	0	3	1
Économies d'énergie annuelles (résultats de la simulation) [MWh]	205	649	2875	130	257	358
Prix de l'énergie [CHF/kWh]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.05
Économies annuelles (sans rabais) [1000 CHF/an]	37	117	432	23	43	17
Augmentation des prix de l'énergie [%/an]	0	0	0	0	0	0
Escompte [%]	1	1	1	1	1	1
Durée d'amortissement / Utilisation [ans]	20	12.5	20	25	20	25
Période d'amortissement [ans]	6	11	41	> 50	7	29

Tableau 2-1 : Résumé des résultats de la première série de simulations avec les mesures d'économie d'énergie potentielles (économies d'énergie annuelles) et le calcul simple de rentabilité.

Sur la base des résultats de la première série de simulations, d'autres mesures utiles ont été définies en collaboration avec la BVB. Les résultats ont montré qu'à certains points du réseau BVB, le maillage est probablement trop petit en raison des alimentations unilatérales afin de réduire l'énergie de freinage de d'utiliser d'autres véhicules. Par conséquent, à titre de mesure supplémentaire, des sections plutôt "isolées" sont actuellement interconnectées au moyen d'opérations de commutation par le biais de nouveaux feeders sectoriels bilatéraux.

Cinq zones de restauration spécifiques ont été définies, qui ont été vérifiées dans un deuxième temps à l'aide de simulations FABEL. Une zone d'alimentation est une zone de réseau dans laquelle les sections d'alimentation sont explicitement interconnectées. Cela a pour effet, d'une part, que davantage de véhicules peuvent utiliser l'énergie de freinage produite dans cette zone et, d'autre part, que la zone d'influence d'une éventuelle mesure stationnaire (onduleur ou stockage d'énergie) peut être élargies. De plus, une simulation avec l'utilisation d'un onduleur a été réalisée pour chaque zone d'alimentation. En outre, des simulations ont été utilisées pour calculer l'avantage d'une éventuelle solution globale, dans laquelle la combinaison des zones d'alimentation examinées, deux onduleurs ainsi que la mesure "augmentation de la tension de freinage" est prise en compte.

Ces variantes de simulation ont montré que les circuits électriques adaptés permettent à la l'énergie de freinage rhéostatique dans les zones d'alimentation étendues est déjà considérablement réduite et en conséquence de quoi le bénéfice réel d'une mesure stationnaire est fortement réduit.

Le tableau 2-2 montre les résultats de ces scénarios avec un onduleur par zone d'alimentation et la variante totale avec deux onduleurs. Le tableau 2-3 montre les résultats des variantes avec les dispositifs de stockage d'énergie.

	Mesures					
	Zone d'alimentation en énérgie 1 avec onduleur Voltas-trasse	Zone d'alimentation énérgétique 2 avec onduleur Morgarten	Zone d'alimentation énérgétique 3 avec onduleur Dreispitz	Zone d'alimentation énérgétique 4 avec onduleur St Alban-Anlage	Zone d'alimentation énérgétique 5 avec onduleur Riehen	Onduleur à solution totale+ Augmenter la tension de récupération
Estimation des coûts d'acquisition, d'installation et d'intégration Onduleur [1000 CHF]	430	430	430	430	430	960
Coûts de maintenance [1000 CHF/an]	1	1	1	1	1	2
Économies d'énergie annuelles (résultats de la simulation) [MWh]	105	123	130	396	320	2126
Prix de l'énergie [CHF/kWh]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05/0.18
Économies annuelles (sans rabais) [1000 CHF/an]	4	5	6	19	15	283
Augmentation des prix de l'énergie [%/an]	0	0	0	0	0	0
Escompte [%]	1	1	1	1	1	1
Durée d'amortissement / Utilisation [ans]	25	25	25	25	25	25
Période d'amortissement [ans]	>50	>50	>50	26	33	3

Tableau 2-2 Résumé des résultats de la deuxième série de simulations avec les zones d'alimentation étendues plus l'onduleur (économies d'énergie annuelles) et le calcul économique simple.

	Mesures					
	Zone d'alimentation 1 avec stockage d'énergie Voltas-trasse	Zone d'alimentation 2 avec stockage d'énergie Morgarten	Zone d'alimentation 3 avec stockage d'énergie Dreispitz	Zone d'alimentation 4 avec stockage d'énergie St Alban-Anlage	Zone d'alimentation 5 avec stockage d'énergie Riehen	Solution totale stockage d'énergie + augmentation de la tension de récupération
Estimation des coûts d'acquisition, d'installation et d'intégration Stockage de l'énergie [1000 CHF]	280	280	280	280	280	660
Coûts de maintenance [1000 CHF/an]	3	3	3	3	3	6
Économies d'énergie annuelles (résultats de la simulation) [MWh]	73	86	91	277	224	1901
Prix de l'énergie [CHF/kWh]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
Économies annuelles (sans rabais) [1000 CHF/an]	10	12	13	47	37	336
Augmentation des prix de l'énergie [%/an]	0	0	0	0	0	0
Escompte [%]	1	1	1	1	1	1
Durée d'amortissement / Utilisation [ans]	20	20	20	20	20	20
Période d'amortissement [ans]	32	25	23	6	8	2

Tableau 2-3 Résumé des résultats de la deuxième série de simulations avec les zones d'alimentation étendues plus le stockage d'énergie (économies d'énergie annuelles) et le calcul économique simple.

Sur la base des résultats, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

Mesures	Évaluation des avantages de la réduction de l'énergie de freinage non utilisée	Évaluation de l'efficacité économique	Conclusion
Augmentation de la tension de récupération	Faible (< 10 %)	profitable	La faisabilité technique (voitures classiques) n'est pas certaine. Contrôle de faisabilité recommandé
Augmentation de la tension du système à 750 V	Faible (< 10 %)	sans gain	Sauf si d'autres raisons justifient une augmentation, cette option ne devrait pas être retenue
Stockage mobile de l'énergie	Élevé (> 80 %)	sans gain	Les coûts pour en bénéficier semblent disproportionnés. Recommandent de ne pas poursuivre cette option. Toutefois, il convient d'en tenir compte lors de l'achat de nouveaux véhicules.
Renforcement de la ligne de contact avec 120mm ² Feeder	Faible (< 10 %)	sans gain	Il est recommandé de ne pas poursuivre ces variantes.
Stockage d'énergie stationnaire	Faible à un endroit (< 10 %) Élevé à plusieurs endroits (> 80 %)	profitable	Cela semble être l'option la plus prometteuse. Il est recommandé de poursuivre la mise en œuvre à plusieurs endroits.
redresseur régénératif	Faible à un endroit (< 10 %) Élevé à plusieurs endroits (> 80 %)	légèrement non rentable	Vérifiez la rentabilité en détail, car il existe une grande sensibilité au prix de l'énergie. D'un point de vue écologique, c'est probablement mieux qu'un système de stockage d'énergie.
Interconnexion des secteurs d'alimentation (extension des zones d'alimentation)	Élevé (> 80 %)	profitable	Contrôle de faisabilité recommandé.

Tableau 2-4 Résumé des avantages et de la rentabilité et conclusion tirée pour chaque mesure examinée



BVB, Energiestudie 2019

Energiesparpotential im Traktionsstromversorgungsnetz der BVB

ECH-113.26-003
Version 3.0

Auftraggeber:

Basler Verkehrs-Betriebe
Münchensteinerstrasse 87
4052 Basel

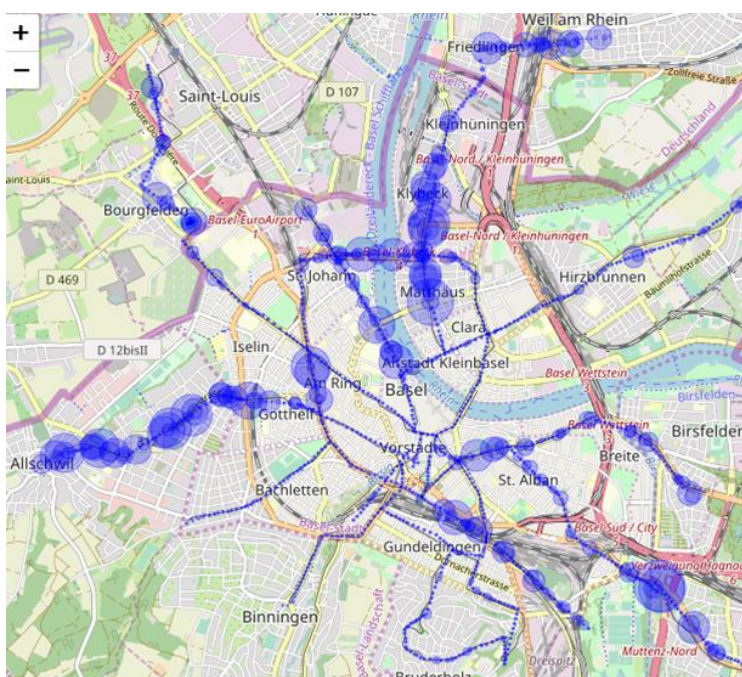
Unterstützt durch das Förderprogramm
Energiesstrategie 2050 im öffentlichen Verkehr
(ESöV 2050)

Herausgeber:

ENOTRAC AG
Seefeldstrasse 8
CH-3600 Thun
Tel. +41 33 346 66 11
Fax +41 33 346 66 12
info@enotrac.com
www.enotrac.com

Freigegeben
17.01.2020

ECH-113.26-003.V3.0.Bericht_BVB_Energiestudie_19.docx
© ENOTRAC AG



**Aktuelle Version**

Version	Datum	Status	Erstellt	Geprüft	Freigegeben
3.0	17.01.2020	Freigegeben	K. Gafner	S. Nydegger	S. Nydegger

Vorherige Version

Version	Datum	Status	Erstellt	Geprüft	Freigegeben
2.0	13.12.2019	Freigegeben	K. Gafner	S. Nydegger	S. Nydegger

Änderungen seit der vorherigen Version

Validierung Simulationsresultate aufgrund neueren Daten von BVB aktualisiert

Urheberrecht

Dieses Dokument wurde durch ENOTRAC AG im Auftrag des Kunden erarbeitet. Für das Dokument und den darin dargestellten Gegenstand erhält der Kunde das Nutzungsrecht. Die Urheberrechte liegen bei ENOTRAC AG. Vervielfältigung, Bekanntgabe an Dritte oder Verwertung seines Inhalts über die vorgesehene Nutzung hinaus sind ohne schriftliche Zustimmung verboten.

© ENOTRAC AG

Bookmarks

Projekttitlel	ProjTitle1	BVB, Energiestudie 2019
	ProjTitle2	
Berichttitlel	DocTitle1	Energiesparpotential im Traktionsstromversorgungsnetz der BVB
	DocTitle2	
	DocTitle3	
Berichtnummer	DocNumber	ECH-113.26-003
Auftraggeber	ClientName	Basler Verkehrs-Betriebe
	ClientAddr	Münchensteinerstrasse 87 4052 Basel
Logos	EnoLogoHeader	ENOTRAC 
	ClientLogo1Header	
	ClientLogo2Header	
Kontakt	Contact	Kevin Gafner, Tel. +41 33 346 66 49
	Contact_Mail	kevin.gafner@enotrac.com

Inhalt:

1	Einleitung	5
2	Zusammenfassung	6
3	Projektumfang	10
3.1	Vorgehen	10
3.2	Abkürzungen / Begriffe	11
3.3	Referenzen	12
3.4	Beschreibung FABEL	13
3.5	Übersicht Simulationen	14
4	FABEL-Modell	18
4.1	Grundmodell	18
4.2	Fahrzeugdaten	18
4.2.1	Im Modell bereits vorhandene Fahrzeuge	18
4.2.2	Cornichon-Tram (Be 4/4)	19
4.3	Weichenheizungen	22
4.4	Fahrplan und Betrieb	22
4.5	Prinzip Hilfsbetriebe (HLK)	24
4.6	Zusätzliche Anpassungen des Modells für die untersuchten Energiesparmassnahmen	25
4.6.1	Rechenbeispiel typischer Bremsvorgang	25
4.6.2	Erhöhung Rekuperationsspannung	26
4.6.3	Erhöhung Systemspannung auf $U_{\text{Nenn}} = 750 \text{ V}$	27
4.6.4	Mobile Energiespeicher	28
4.6.5	Fahrleitungsverstärkung mit 120mm^2 Feeder	29
4.6.6	Stationärer Energiespeicher	29
4.6.7	Rückspeisefähiger Gleichrichter (Wechselrichter)	30
5	Vorgehen Berechnung Energieverbrauch	31
5.1	Grundsätzliches Vorgehen	31
5.2	Standortwahl für stationäre Energiespeicher und Wechselrichter	32
5.3	Erweiterte Speisegebiete mit und ohne Einsatz einer stationären Energiesparmassnahme	34
5.3.1	Speisegebiet 1: Voltastrasse	36
5.3.2	Speisegebiet 2: Morgarten	37
5.3.3	Speisegebiet 3: Dreispitz	38
5.3.4	Speisegebiet 4: WR St. Alban-Anlage	38
5.3.5	Speisegebiet 5: WR Riehen	39
6	Ergebnisse	40
6.1	Grundvariante	40
6.2	Vergleich mit BVB-Messungen – Validierung	41
6.3	Ergebnisse Energiesparmassnahmen – Schritt 1	45
6.3.1	Übersicht Resultate	45
6.3.2	Interpretation und Bemerkungen	48

6.4	Ergebnisse Energiesparmassnahmen – Schritt 2 (Speisegebiete)	52
6.4.1	Übersicht Resultate	52
6.4.2	Interpretation und Bemerkungen	56
7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	57
7.1	Parameter zur Berechnung der Rentabilität	57
7.1.1	Anschaffungs-, Installationskosten und Integrationskosten	57
7.1.2	Energiepreis	59
7.1.3	Abzinsung / Diskontierung	59
7.1.4	Abschreibung	59
7.2	Zusammenfassung und Rentabilität der Massnahmen (Schritt 1)	61
7.3	Zusammenfassung und Rentabilität der Massnahmen erweiterte Speisegebiete (Schritt 2)	62
7.4	Sensitivitätsanalyse	65
8	Fazit, Diskussion, weiteres Vorgehen	66
8.1	Zusammenfassung	66
8.2	Variante Erhöhung Rekuperationsspannung	68
8.3	Variante Erhöhung Systemspannung $U_{\text{Nenn}} = 750 \text{ V}$	68
8.4	Variante mobiler Energiespeicher	68
8.5	Variante Fahrleitungsverstärkung mit $2 \times 120 \text{ mm}^2$ Feeder	69
8.6	Variante stationärer Energiespeicher	69
8.7	Variante Rückspeisefähiger Gleichrichter (Wechselrichter)	70
8.8	Varianten erweiterte Speisegebiete	70
8.9	Weitere Erkenntnisse	71
8.9.1	Bedarfsabhängige Steuerung der Weichenheizungen	71
8.9.2	Ersatz der Cornichon-Flotte	71

1 EINLEITUNG

Im Jahr 2017 haben BVB auf ihren Tram-Fahrzeugen Messungen durchgeführt und festgestellt, dass ein namhafter Anteil an ungenutzter Bremsenergie in den Bremswiderständen der Fahrzeuge verheizt wird. Mit vorliegender Studie wurden nun zum Thema Rekuperation mittels Netzberechnungen diverse Energieoptimierungsmassnahmen untersucht. Folgende Fragen sollen dabei beantwortet werden:

- 1) Ist mit der heutigen auf dem BVB-Netz verkehrenden Flotte und mit dem heute vorhandenen Traktionsstromnetz eine komplette Nutzung der rekuperierten Energie möglich?
- 2) Sind lokale Unterschiede zwischen Innenstadtbereiche und einzelnen Stichstrecken in den Aussenbezirken festzustellen?
- 3) Aufzeigen des Nutzens möglicher Massnahmen hinsichtlich der Fragen 1) und 2):
 - a) Spannungserhöhung von Nennspannung 600 V auf 750 V
 - b) Erhöhung der Rückspeisespannung von $U_{\max 1} = 720 \text{ V}$ auf $U_{\max 2} = 800 \text{ V}$ gemäss EN 50163 [11] (unter Berücksichtigung der zeitlichen Limitierung auf 5 Minuten).
 - c) Stationäre Energiespeicher
 - d) Energiespeicher auf den Fahrzeugen
 - e) Rückspeisefähige Gleichrichter (Wechselrichter)
 - f) Querschnittserhöhung der Verstärkungsleitung auf $2 \times 120\text{mm}^2$
- 4) Welche Reserven betreffend Anzahl rekuperierenden Fahrzeugen ergeben sich für die Fragen 1) bis 3) und die allgemeine Energieversorgung, wenn angenommen wird, dass zusätzliche Beschaffungen von Fahrzeugen gleicher Bauart erfolgen?
- 5) Massnahmen wo möglich wirtschaftlich bewerten (Investitions- und Betriebskosten).

BVB kamen aufgrund der in den letzten vier Jahren vorgenommenen Beobachtungen und Messungen auf ihrem Netz zu nachfolgenden Erkenntnissen und Vermutungen. Diese sollen in den vorliegenden Betrachtungen bestätigt oder widerlegt werden.

- Der Energieverbrauch in den Combino und Flexity Fahrzeugen ist im Winter durchschnittlich höher als im Sommer. Vermutung: Energiebedarf für Heizung höher als fürs kühlen.
- Im ganzen Jahr wird Energie im Bremswiderstand verheizt. Der Betrag ist im Winter jedoch niedriger als im Sommer. Vermutung: Nebst aufgrund des grundsätzlich höheren Verbrauchs der Fahrzeuge, welcher vorangehend erwähnt wurde, ist das Netz im Winter auch wegen den zusätzlichen Weichenheizungen aufnahmefähiger für Bremsenergie.
- Die BVB sehen eine Optimierung der Weichenheizung vor. Aktuell werden die Heizungen zum im Oktober eingeschalten und im März wieder ausgeschalten. Neu sollen diese bedarfsgesteuert betrieben werden. Mit einer bedarfsgesteuerten Weichenheizung wird eine angenommene Einsparung um 2/3 des ursprünglichen Verbrauches erwartet. Deshalb wird vermutet, dass in dieser Zeit tendenziell wieder mehr ungenutzte Bremsenergie anfällt und sich die Energiebilanz im Bremswiderstand der Fahrzeuge verschlechtert.

Vorliegende Untersuchung zum Nutzen potentieller Energiesparmassnahmen im Tram-Netz der Basler Verkehrsbetriebe wurde durch das BAV im Rahmen des Programms ESöV 2050 (Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr) gefördert.

2 ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel vorliegender Studie war, das Potential diverser Massnahmen zur Reduktion der ungenutzten Bremsenergie im Traktionsstromversorgungsnetz der BVB zu quantifizieren. Obschon der Fokus klar auf der technischen Seite lag, wurde auch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt, welche BVB zusätzlich als Grundlage für die zukünftige Strategie zum Thema Energieeffizienz dienen soll.

In einem ersten Durchgang wurde der Nutzen von potentiellen Energiesparmassnahmen simulatorisch untersucht und die Ergebnisse einander gegenüber gestellt. Eine ausführliche Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse ist in Kapitel 7.4, am Schluss der Studie zu finden. Die Ergebnisse der ersten Simulationsreihe sowie der einfachen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Amortisationszeit) lassen sich wie folgt zusammenfassen.

	Massnahme					
	Erhöhung der Bremsspannung	Erhöhung der Nennspannung	mobile Energiespeicher	120mm ² Feeder	Energiespeicher Voltastrasse	Wechselrichter Voltastrasse
Geschätzte Anschaffungs-, Installations- und Integrationskosten [1000 CHF]	100	1200	14600	7300	280	430
Wartungskosten [1000 CHF/Jahr]	0	0	89	0	3	1
Jährliche Energieersparnis (Simulationsresultate) [MWh]	205	649	2875	130	257	358
Massgebender Energiepreis [CHF/kWh]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.05
Jährliche Ersparnisse (nicht diskontiert) [1000 CHF/Jahr]	37	117	432	23	43	17
Anstieg Energiepreis [%/Jahr]	0	0	0	0	0	0
Diskontierung [%]	1	1	1	1	1	1
Abschreibungsdauer / Nutzung [Jahre]	20	12.5	20	25	20	25
Amortisationszeit [Jahre]	3	11	41	> 50	7	29

Tabelle 2-1: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der ersten Simulationsreihe mit den potentiellen Energiesparmassnahmen (jährliche Energieersparnis) und der einfachen Wirtschaftlichkeitsrechnung. Die Wahl der einzelnen Parameter ist in den entsprechenden Kapiteln näher erläutert.

Basierend auf den Ergebnissen aus der ersten Simulationsreihe wurden gemeinsam mit BVB weitere sinnvolle Massnahmen definiert. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass wohl an einigen Stellen im BVB-Netz durch die einseitigen Speisungen die Vermaschung zu gering ist, um die Bremsenergie durch anderer Fahrzeuge zu nutzen. Daher wurden als weitere Massnahme momentan eher „isolierte“ Abschnitte mittels Schalthandlungen über neue 2-seitige Sektorspeisungen zusammengeschaltet.

Es wurden dabei fünf spezifische Speisegebiete definiert, welche in einem zweiten Durchgang wiederum mittels FABEL-Simulationen überprüft wurden. Als Speisegebiet wird dabei ein Netzbereich bezeichnet, in welchem Speiseabschnitte explizit zusammengeschaltet sind. Dies bewirkt einerseits, dass in diesem Gebiet mehr Fahrzeuge die anfallende Bremsenergie nutzen können und andererseits, dass auch der Einflussbereich einer möglichen stationären Massnahme (Wechselrichter oder Energiespeicher) vergrössert werden kann. Zusätzlich wurde also für jedes Speisegebiet jeweils auch

eine Simulation mit Einsatz eines Wechselrichters durchgeführt. Weiter wurde mit Simulationen der Nutzen einer möglichen Gesamtlösung berechnet, in welcher die Kombination der untersuchten Speisegebiete, zwei Wechselrichter sowie die Massnahme „Erhöhung der Bremsspannung“ berücksichtigt ist.

Diese Simulationsvarianten haben ergeben, dass durch die angepassten Netzschaltungen die rheostatische Bremsenergie in den erweiterten Speisegebieten bereits erheblich reduziert wird und dadurch der eigentliche Nutzen einer stationären Massnahme stark abnimmt.

In Tabelle 2-2 sind die Ergebnisse dieser Szenarien mit je einem Wechselrichter pro Speisegebiet und der Gesamtvariante mit zwei Wechselrichtern zusammengefasst dargestellt. In Tabelle 2-3 sind die Ergebnisse der Varianten mit Energiespeichern dargestellt.

	Massnahme					
	Speisegebiet 1 mit WR Voltastrasse	Speisegebiet 2 mit WR Morgarten	Speisegebiet 3 mit WR Dreispitz	Speisegebiet 4 mit WR St. Alban-Anlage	Speisegebiet 5 mit WR Riehen	Gesamtlösung WR + Erh. Rekup.-Spg.
Geschätzte Anschaffungs-, Installations- und Integrationskosten Wechselrichter [1000 CHF]	430	430	430	430	430	960
Wartungskosten [1000 CHF/Jahr]	1	1	1	1	1	2
Jährliche Energieersparnis (Simulationsresultate) [MWh]	105	123	130	396	320	2126
Massgebender Energiepreis [CHF/kWh]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05 / 0.18
Jährliche Ersparnisse (nicht diskontiert) [1000 CHF/Jahr]	4	5	6	19	15	283
Anstieg Energiepreis [%/Jahr]	0	0	0	0	0	0
Diskontierung [%]	1	1	1	1	1	1
Abschreibungsdauer / Nutzung [Jahre]	25	25	25	25	25	25
Amortisationszeit [Jahre]	> 50	> 50	> 50	26	33	3

Tabelle 2-2: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der zweiten Simulationsreihe mit den erweiterten Speisegebieten plus Wechselrichter (jährliche Energieersparnis) und der einfachen Wirtschaftlichkeitsrechnung. Die Wahl der einzelnen Parameter ist in den entsprechenden Kapiteln näher erläutert. (Kopie von Tabelle 7-2)

	Massnahme					
	Speisegebiet 1 mit ES Voltastrasse	Speisegebiet 2 mit ES Morgarten	Speisegebiet 3 mit ES Dreispitz	Speisegebiet 4 mit ES St. Alban-Anlage	Speisegebiet 5 mit ES Riehen	Gesamtlösung ES + Erh. Rekup.-Spg.
Anschaffungs-, Installations- und Integrationskosten Energiespeicher [1000 CHF]	280	280	280	280	280	660
Wartungskosten [1000 CHF/Jahr]	3	3	3	3	3	6
Jährliche Energieersparnis (Simulationsresultate) [MWh]	73	86	91	277	224	1901
Massgebender Energiepreis [CHF/kWh]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
Jährliche Ersparnisse (nicht diskontiert) [1000 CHF/Jahr]	10	12	13	47	37	336
Anstieg Energiepreis [%/Jahr]	0	0	0	0	0	0
Diskontierung [%]	1	1	1	1	1	1
Abschreibungsdauer / Nutzung [Jahre]	20	20	20	20	20	20
Amortisationszeit [Jahre]	32	25	23	6	8	2

Tabelle 2-3: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der zweiten Simulationsreihe mit den erweiterten Speisegebieten plus Energiespeicher (jährliche Energieersparnis) und der einfachen Wirtschaftlichkeitsrechnung. Die Wahl der einzelnen Parameter ist in den entsprechenden Kapiteln näher erläutert. (Kopie von Tabelle 7-3)

Basierend auf den Ergebnissen, lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ableiten:

Massnahme	Beurteilung Nutzen zur Reduktion der ungenutzten Bremsenergie	Beurteilung Wirtschaftlichkeit	Schlussfolgerung
Erhöhung der Bremsspannung	Gering (< 10 %)	rentabel	Technische Machbarkeit (Oldtimer) nicht sicher. Prüfung der Umsetzbarkeit empfohlen
Erhöhung der Systemspannung auf 750 V	Gering (< 10 %)	nicht rentabel	Falls nicht andere Gründe für eine Erhöhung bestehen, ist diese Variante nicht weiterzuverfolgen
mobile Energiespeicher	Hoch (> 80 %)	nicht rentabel	Kosten zum Nutzen scheinen unverhältnismässig hoch. Empfohlen, diese Variante nicht weiterzuverfolgen. Bei Beschaffung von Neufahrzeugen ist dies jedoch zu prüfen.

Massnahme	Beurteilung Nutzen zur Reduktion der ungenutzten Bremsenergie	Beurteilung Wirtschaftlichkeit	Schlussfolgerung
Fahrleitungsverstärkung mit 120mm ² Feeder	Gering (< 10 %)	nicht rentabel	Empfohlen, diese Variante nicht weiterzuverfolgen.
stationärer Energiespeicher	An einem Standort gering (< 10 %) An mehreren Standorten hoch (> 80 %)	rentabel	Scheint die vielversprechendste Variante. Empfohlen, die Umsetzung an mehreren Standorten weiterzuverfolgen.
rückspeisefähiger Gleichrichter	An einem Standort gering (< 10 %) An mehreren Standorten hoch (> 80 %)	knapp nicht rentabel	Rentabilität im Detail prüfen, da hohe Sensitivität zum Energiepreis besteht. Aus ökologischer Sicht wohl besser als ein Energiespeicher.
Zusammenschalten von Speisesektoren (Speisegebiete erweitern)	Hoch (> 80 %)	rentabel	Prüfung der Umsetzbarkeit empfohlen

Tabelle 2-4: Zusammenfassung von Nutzen und Rentabilität sowie der abgeleiteten Schlussfolgerung pro untersuchte Massnahme

3 PROJEKTUMFANG

3.1 Vorgehen

Für die erforderlichen Netzsimulationen wurde das speziell für die Untersuchung von Fahrstromversorgungen entwickelte EDV-Hilfsmittel FABEL eingesetzt. Eine Beschreibung ist in Kapitel 3.4 zu finden. FABEL wurde bereits bei etlichen BVB-Studien für Lastberechnungen eingesetzt, wie Gesamtnetzstudie, Studie der Berührungsspannung oder Kurzschlussberechnungen, und konnte dadurch fortlaufend den aktuellen Netzausbauten entsprechend weitergepflegt werden. Das zu Beginn der Studie vorhandene Modell entsprach dem Netz-Zustand 2018 basierend auf der kürzlich durchgeführten Gesamtnetzstudie [1] und konnte daher für die vorliegende Energiestudie als Basis verwendet werden.

Bis dato wurde das Simulationsmodell bei BVB für Lastberechnungen verwendet. Der Fokus dieser Studie liegt nun aber beim Energiesparpotential. Der dabei zu Grunde gelegte und für die Energieverbrauchs-Betrachtungen relevante Betrieb unterscheidet sich vom anwendbaren Betrieb für eine Laststudie. Denn bei einer Laststudie wird prinzipiell von einem für die Energieversorgung schlimmsten Szenario ausgegangen. Bei Energiebetrachtungen wird jedoch grundsätzlich auf mittleren Belastungen basiert, damit möglichst ein repräsentativer Jahresmittelwert betrachtet wird. Daher wurde in einem ersten Schritt den für die Untersuchung relevanten Betrieb im Modell entsprechend erfasst.

Massgebend für die Belastung sind insbesondere die Zuladung der Fahrzeuge, die für die Hilfsbetriebe (HLK) der Fahrzeuge benötigte Leistung sowie der Fahrplan selbst (Zugfolgezeit, eingesetztes Rollmaterial). Um einen mittleren Energieverbrauchswert ermitteln zu können, muss in den Simulationen für den Fahrplan ein ganzer Tag (Wochentag) simuliert werden. Das heisst, inkl. der Ein- und Ausfahrten beim Depot, jedoch ohne die nötige Energie für stillstehende Fahrzeuge in den Depots. Mehr Details zum berücksichtigten Fahrplan sind in Kapitel 4.4 beschrieben. Eine solche Tagessimulation wurde zudem jeweils für drei Szenarien mit unterschiedlichen Aussentemperaturen durchgeführt:

- einmal für einen mittleren Frühling/Herbst-Tag (Leistungsbedarf für Klimatisierung gering),
- einmal für einen mittleren Sommer-Tag (hoher Leistungsbedarf für Klimatisierung) und
- einmal für einen mittleren Winter-Tag (hoher Leistungsbedarf für Heizung).

In den Winter-Szenarien werden zudem im Netzmodell die Weichenheizungen als Verbraucher mitberücksichtigt, einmal ganztags konstant und einmal bedarfsabhängig eingeschaltet.

Grundsätzlich wurde in den Simulationen ein gemischter Fahrzeugpark berücksichtigt. Zu dem aus früheren Studien verfügbaren Grundmodell, welches die Tram Combino, Flexity und Tango bereits beinhalteten, musste zusätzlich das alte Cornichon modelliert werden, welches nicht rückspeisefähig ist.

Auf Basis der typischen, mittleren Tagesenergieverbrauchswerte kann anschliessend der Energieverbrauch für ein Jahr hochgerechnet werden. Bei der Studie interessiert zudem auch der Anteil ungenutzter Bremsenergie (pro Tag oder pro Jahr). Dieser ungenutzte Anteil entspricht dem eigentlichen Energiesparpotential und zeigt somit einerseits die Grössenordnung ungenutzter Bremsenergie sowie andererseits, den Nutzen allfälliger Massnahmen. Anhand der Simulationsergebnisse für die Referenzsimulation (ohne Massnahmen) wurde zudem das Modell mit gemessenen Energieverbrauchswerten von IWB/BVB abgeglichen.

Wie eingangs beschrieben, ist das primäre Ziel der vorliegenden Studie, diverse Energiesparmassnahmen mittels Simulationen zu untersuchen: Erhöhung der Rekuperationsspannung, Erhöhung der Systemspannung von 600 V auf 750 V, Vergrösserung des Fahrleitungsquerschnitts, mobile (fahrzeuggebundene) und stationäre Energiespeicher sowie rückspeisefähige Gleichrichter (Wechselrichter). Dabei interessiert, wie viel Gesamtenergie und rheostatische Bremsenergie pro Jahr eingespart werden kann und ob die, für die Massnahmen notwendigen Investitionskosten amortisiert werden können - dies basierend auf einer einfachen Wirtschaftlichkeitsrechnung.

Wie und an welchen Orten die infrastrukturseitigen Massnahmen (stationäre Energiespeicher, Wechselrichter) im Modell zu berücksichtigen sind, wurde aufgrund der Erkenntnisse aus den Referenzsimulationen für die Grundvariante bestimmt.

Vorliegende Studie hat den Schwerpunkt klar auf der technischen Seite. Auf die übergeordnete Beurteilung des ökonomischen (Wirtschaftlichkeit) wie auch ökologischen Gesamtnutzens wird nur am Rande eingegangen. Die Studie soll die Grundlage liefern, damit BVB im Anschluss Diskussionen wie zu CO₂-Einsparung, Marketing oder Einhaltung Leitbild fundiert führen kann. Zudem war das Ziel der Studie, erstmals die Grössenordnung des Nutzens möglicher Massnahmen aufzuzeigen. Die Optimierung einer möglichen Massnahme (wie Dimensionierung, Kennlinie, Standorte,...) hinsichtlich Effizienz und Kosten-Nutzen-Verhältnis für eine konkrete Umsetzung, erfolgt erst in einem späteren Schritt.

Die Ergebnisse zu Energiespeicher und Wechselrichter haben wie erwartet gezeigt, dass der Wirkungsbereich der einzelnen Massnahme über das ganze Netz gesehen, eher begrenzt ist. Bei der Auswertung und Diskussion der Ergebnisse kam daher die Frage auf, ob durch Zusammenschalten weiterer Sektoren der Wirkungsbereich eines stationären Energiespeichers oder Wechselrichters erweitert werden könnte. Zudem interessiert, wie viele Anlagen etwa benötigt würden, damit die ungenutzte Bremsenergie möglichst flächendeckend über das ganze BVB-Netz minimiert werden kann.

Basierend auf den Ergebnissen aus der ersten Simulationsrunde wurde als erste Konkretisierung möglicher Massnahmen folglich gemeinsam mit BVB das BVB-Netz in fünf Wirkungsbereiche (erweiterte Speisegebiete) unterteilt. Dabei werden grundsätzlich mittels Anpassung der Netzschaltungen grössere zusammenhängende Speiseabschnitte gebildet, um so die anfallende Bremsenergie besser zu nutzen. Gleichzeitig können diese Speisegebiete zusätzlich mit einer stationären Energiesparmassnahme (Energiespeicher oder Wechselrichter) kombiniert werden, wodurch gegebenenfalls auch der Wirkungsbereich für Energiespeicher oder Wechselrichter erhöht werden soll. Diese Speisegebiete wurden deshalb in einem zweiten Schritt sowohl ohne als auch mit Wechselrichter simulatorisch untersucht.

3.2 Abkürzungen / Begriffe

Begriff	Definition
BLT	Baselland Transport AG
BVB	Basler Verkehrsbetriebe
Cornichon	Fahrzeugtyp von Schindler Waggon und BBC, bei der BVB im Einsatz
Combino	Fahrzeugtyp von Siemens, bei der BVB im Einsatz
DT Cornichon	Cornichon-Tram in Doppeltraktion
ES	Abkürzung für Energiespeicher

Begriff	Definition
ESöV	Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr
ET Cornichon	Cornichon-Tram in Einfachtraktion
FABEL	Simulationssoftware der ENOTRAC AG (siehe auch Kapitel 3.4)
Feeder	Parallel zum Fahrdrabt verlaufender zusätzlicher Verstärkungsleiter. Dieser ist in regelmässigen Abständen mit dem Fahrdrabt verbunden.
Flexity	Fahrzeugtyp von Bombardier, bei der BVB im Einsatz
GR	Gleichrichter
HLK	Begriff für die Hilfsbetriebe: H eizung, L üftung und K lima
HVZ	Hauptverkehrszeit
IWB	„Industrielle Werke Basel“ ist der Energielieferant für das BVB-Traktionsstromversorgungsnetz
N-1	Ausfall einer Anlage oder eines Anlageteils (wie Gleichrichter, Abgang oder Rückleiterkabel)
Rekuperation	Verfahren zur Rückgewinnung von Energie bei einem Bremsvorgang
Tango	Fahrzeugtyp von Stadler, bei der BLT im Einsatz
Wh	Abkürzung für Weichenheizung
WR	Abkürzung für Wechselrichter (rückspeisefähiger Gleichrichter)

Tabelle 3-1: Abkürzungsverzeichnis

3.3 Referenzen

- [1] Bericht zur Aktualisierung Gesamtnetzstudie, ECH-113.22-100 V2.0 vom 11.09.2018, ENOTRAC
- [2] Bericht zum Speisekonzept auf dem Ast Richtung Allschwil, ECH-113.21-001.V1.0. vom 24.08.2017, ENOTRAC
- [3] Liniennetzplan von Basel und Umgebung Version 12.2017, Download von <https://www.bvb.ch/de/fahrplan/liniennetz/>, BVB
- [4] Schaltschema, Energieversorgung 600 V, Stand 2019, 0'420'1'015, BVB
- [5] Grafische Fahrplandaten für den Normalbetrieb von BVB, gültig ab 15. Dezember 2017, BVB
- [6] Statistische Übersicht Fahrzeugeinsatz pro Linie bei BVB, „190507 Anfrage Flückiger Fahrzeugeinsatz.xlsx“ vom 07.05.2019, BVB
- [7] Statistische Übersicht zur Auslastung der Fahrzeuge, „190507 Anfrage Flückiger Auslastung.xlsx“ vom 07.05.2019, BVB
- [8] BVB Weichenplan 2018 vom 06.12.2017, BVB
- [9] BVB Energieverbrauch Betriebsfahrzeuge vom Jahr 2017 (Kennzahlen Technik 7a), Januar 2018, BVB
- [10] E-Mail von Yves Flückiger (BVB) an Stefan Nydegger (ENOTRAC) vom Mo 05.11.2018

- [11] EN 50163: Bahnanwendungen – Speisespannungen von Bahnnetzen vom November 2004, CENELEC
- [12] Verordnung des UVEK über das Rechnungswesen der konzessionierten Unternehmen RKV, 742.221, 01.03.2016
- [13] Inflationsrate in der Schweiz; <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/preise.html> am 23.08.2019, Bundesamt für Statistik

3.4 Beschreibung FABEL

FABEL ist ein von ENOTRAC AG entwickeltes Softwarepaket, das der Betriebssimulation fahrleitungsgebundener Verkehrssysteme (Bahnen, Tram, Trolleybusse) dient. Dabei wird ein fahrplanmässiger Betrieb in Wechselwirkung mit dem überlagerten Wechsel- oder Gleichstromnetz während einem gewünschten Zeitraum simuliert. Das Netz kann stark vermascht sein und von einer praktisch beliebigen Anzahl Züge gleichzeitig befahren werden.

Die Hauptanwendungen von FABEL sind die Auslegung von neuen Stromversorgungen und Fahrleitungsanlagen, die Optimierung bestehender Anlagen, Planung von Umbauten, Dimensionierung von Fahrzeugen, Evaluation von Energiesparmassnahmen sowie die Auslegung von Schutzeinstellungen. Das elektrische Netz in FABEL erlaubt zudem das Ermitteln von Kurzschlussströmen an beliebigen Kurzschlussorten.

Für die Fahrsimulation werden im Modell Parameter zur Strecke (Steigungen, Gefälle, Kurven, Tunnel, Stationen, Signalisierung), zum elektrischen Netz, zu den Fahrzeugen (Zug-/Bremskraftcharakteristiken, Massenverteilung über die Zuglänge, Fahrwiderstände, Eigenbedarf usw.) und zum Betrieb (Fahrplan, Passagierzuladung) im Detail berücksichtigt. Mit einer überlagerten Begrenzung der maximalen Beschleunigung, Verzögerung und des Rucks sowie einer Kollisionsschutzfunktion wird eine wirklichkeitsnahe Fahrweise erreicht. All dies gestattet ein realistisches Abbild des zu untersuchenden Systems.

FABEL ermittelt aufgrund der Modelldaten die Stromflüsse und die effektiven Spannungen im Netz (Fahrleitungsabschnitte, Verbindungsleitungen, Lastschalter, Unterwerke, Energiespeicher) als Funktion der Zeit. Der momentane Ort und der Leistungsbedarf der fahrenden Züge werden zu jedem Zeitpunkt berücksichtigt. Nebst normalen Spannungs- oder Stromquellen können ebenfalls Energiespeicher oder steuerbare Quellen (Umrichter) eingesetzt werden. Da sich Strom und Spannung gegenseitig beeinflussen, arbeitet der Algorithmus mit einem komplexen Iterationsprozess. FABEL ist für die Simulation von Wechselstromsystemen ebenso geeignet wie für Gleichstromsysteme. Bei Letzteren kann entweder nur das Gleichstromnetz oder zusätzlich auch das speisende Wechselstromnetz modelliert werden. Bei Wechselstromnetzen kann FABEL sowohl für die Simulation von 1-Phasen- als auch 3-Phasen-Systemen oder auch für Fahrstromversorgungen mit Autotransformatoren eingesetzt werden.

FABEL bietet zudem die Möglichkeit, in der Fahrsimulation die Streckensignalisierung respektive das Zugsicherungssystem abzubilden. Dabei können konventionelle, streckenseitige Lichtsignale als auch dynamische Blockabschnitte (Fahren im relativen Bewegungsabstand, ETCS Level 3) modelliert werden. Dies ermöglicht in den Simulationen die Berücksichtigung eines realistischen Betriebs, aber auch die Untersuchung und Optimierung bestehender oder neuer Signalisierungskonzepte.

Mit dem Modul OptiDrive von FABEL können für gegebene Fahrpläne energieoptimierte Fahrprofile ermittelt werden. Dabei werden aufgrund der vorhandenen Fahrzeitreserven in Abhängigkeit der

Streckenbedingungen (wie Stationen, Streckengeschwindigkeit, Steigungen/Gefälle) und der Zugsgattung die optimale Reisegeschwindigkeit ermittelt sowie Abschnitte definiert, bei welchen die Züge ohne Zugkraft fahren sollen (Ausrollen / Coasting).

Im simulierten Netz lassen sich an beliebigen Orten Strom und Spannung zeitabhängig auswerten und grafisch darstellen. Bei den Fahrzeugen können neben Spannung und Strom weitere Angaben zum Fahrverhalten zeit- und ortsabhängig ausgewertet werden. Unter Berücksichtigung der gegebenen Leitergeometrie, Materialdaten und Umweltparameter (Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung) können direkt aus FABEL auch die für Fahrdrähte und Leiterseile resultierenden Temperaturverläufe berechnet werden. FABEL löst die nichtlinearen Gleichungen des Wärmeübergangs numerisch. Dabei wird die Wärmeabhängigkeit des elektrischen Widerstandes des Leiters ebenso berücksichtigt wie die vom momentanen Arbeitspunkt abhängige Zeitkonstante der Erwärmung und Abkühlung.

Alle Modelldaten und Resultate sind in einer relationalen Datenbank vorhanden. Damit ist einerseits die lückenlose Rückverfolgung der Simulationen gewährleistet. Andererseits sind die Resultate schnell und in beliebigen Kombinationen für die Auswertungen abrufbar. Eine auf die jeweilige Aufgabenstellung angepasste Auswertung ist daher einfach realisierbar.

FABEL ist durch mehrere Vergleichsmessungen mit realen Stromversorgungsanlagen und Zugfahrten validiert worden und wird von ENOTRAC seit über 25 Jahren in Projekten weltweit eingesetzt. FABEL wurde und wird weiterhin durch ein Team von ENOTRAC-Spezialisten ständig den neuen Bedürfnissen und dem Stand der Technik angepasst. FABEL ist zudem eines der Referenz-Tools bei der Erarbeitung der neuen Norm prEN 50641:2014 (*Anforderungen für die Validierung von Simulationsprogrammen für die Auslegung von Bahnenergieversorgungssystemen*).

3.5 Übersicht Simulationen

Tabelle 3-3 zeigt eine Übersicht der mit FABEL durchgeführten Simulationen. Grundsätzlich wurden für jede Variante drei Simulationen durchgeführt, welche je einen ganzen Tag für die Jahreszeiten Frühling/Herbst, Sommer und Winter abbilden. Nachfolgende Tabelle zeigt eine Übersicht der betrachteten Varianten / Massnahmen:

Version	Variante	Bemerkung
100xx	Grundvariante (Normalzustand)	Ohne Massnahme, Rekuperation bis $U_{Max1} = 720 \text{ V}$
200xx	Erhöhung der Rekuperationsspannung	Rekuperation bis $U_{Max2} = 800 \text{ V}$
300xx	Erhöhung der Systemspannung auf 750 V	
400xx	Mobiler Energiespeicher (onboard)	Mobile Energiespeicher Flexity und Combino Tram
500xx	Erhöhung Fahrleitungsquerschnitt	BVB-Fahrleitung mit $1 \times 120 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ Feeder pro Gleis
6xxxx	Stationärer Energiespeicher	Standort GR Voltastrasse (siehe Kapitel 5.2)
7xxxx	Wechselrichter	Standort GR Voltastrasse und Speisegebiet-Varianten mit Wechselrichter (siehe Kapitel 5.3)
8xxxx	erweiterte Speisegebiete ohne und mit einer stationären Energiemassnahme	Einzelne Speisegebiete und mögliche Gesamtlösung (siehe Kapitel 5.3)

Tabelle 3-2: Übersicht der untersuchten Energiesparvarianten

Das Prinzip zur Bezeichnung der durchgeführten Simulationen ist wie folgt gewählt:

1. Ziffer	Simulationsvariante gemäss Tabelle 3-2
2.+3. Ziffer	Laufnummer; ist nur relevant für die Varianten stationärer Energiespeicher und Wechselrichter (Standorte gemäss Kapitel 5.2)
Buchstaben	Jahreszeit: Frühling/Herbst (FH), Sommer (S) oder Winter (W) Zustand Weichenheizung im Winter: k = konstant, b = Bedarf gesteuert

Um den Einfluss der Weichenheizsteuerung aufzuzeigen (siehe Kapitel 4.3), wurden für die Grundvariante (ohne Massnahme) das Szenario Winter mit konstant eingeschalteter Weichenheizung sowie mit bedarfsgesteuerter Weichenheizung durchgeführt. Dies ergibt grundsätzlich die beiden Grundvarianten 1 und 2.

Mit der dritten Grundvariante wurden die im Fahrplan eingesetzten Fahrzeuge vom Typ Cornichon (Be 4/4 sind ältere Fahrzeuge, welche nicht rückspeisefähig sind) durch moderne Fahrzeuge vom Typ Flexity ersetzt. Diese Grundvariante zeigt unter anderem, welche ungenutzte Bremsenergie beim Ersatz der Cornichon-Tram noch zusätzlich anfallen würde. Sie dient aber auch als Referenzvariante für die Massnahme „Erhöhung Systemspannung auf 750 V“, bei welcher davon auszugehen ist, dass ein Betrieb mit Cornichon-Tram nicht mehr sinnvoll ist.

Für die Beantwortung der gestellten Fragen zu den Massnahmen Wechselrichter und Energiespeicher machte es wenig Sinn, diese für jeden möglichen Gleichrichterstandort im BVB-Netz zu untersuchen (wie in Kapitel 5.2 erläutert, sollten stationäre Energiespeicher vorzugsweise bei Gleichrichterstationen installiert werden). Mit 25 Gleichrichtstandorten würde dies für Wechselrichter und Energiespeicher und zur Abdeckung der Jahreszeiten immerhin 150 Simulationen ergeben. Aufwand zu Nutzen scheint dazu unverhältnismässig hoch. Für die Standortwahl wurde daher zunächst für jeden Standort nur für das Szenario Winter mit der Massnahme Wechselrichter simuliert (Varianten 701 – 725). Basierend auf diesen Ergebnissen wurde der für die Studie repräsentative Standort bestimmt. Die Wahl fiel dabei auf den Standort Voltastrasse. Details dazu siehe Kapitel 5.2.

Version	Variante	Jahreszeit	Datenbank
100FH	Grundvariante 1/2	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190806_165449
100S	Grundvariante 1/2	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190806_111905
100Wk	Grundvariante 1 (Wh konstant)	Winter	r_p113p26m002v01_36_190806_114334
100Wb	Grundvariante 2 (Wh bedarf.)	Winter	r_p113p26m002v01_36_190806_114230
101FH	Grundvariante 3	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190822_084755
101S	Grundvariante 3	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190822_084827
101Wb	Grundvariante 3 (Wh bedarf.)	Winter	r_p113p26m002v01_36_190822_084847
200FH	höhere Bremsspannung	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190820_134608
200S	höhere Bremsspannung	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190820_134621
200Wb	höhere Bremsspannung	Winter	r_p113p26m002v01_36_190820_134637
300FH	Erhöhung Nennspannung 750V	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190822_084755
300S	Erhöhung Nennspannung 750V	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190822_084827
300Wb	Erhöhung Nennspannung 750V	Winter	r_p113p26m002v01_36_190822_084847
400FH	mobile Energiespeicher	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190813_135209
400S	mobile Energiespeicher	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190813_135233
400Wb	mobile Energiespeicher	Winter	r_p113p26m002v01_36_190813_135102
500FH	Fahrleitungsverstärkung	Frühling/Herbst	r_p113p26m004v02_14_190813_170655
500S	Fahrleitungsverstärkung	Sommer	r_p113p26m004v02_35_190813_170631

Version	Variante	Jahreszeit	Datenbank
500Wb	Fahrleitungsverstärkung	Winter	r_p113p26m004v02_36_190813_170459
601FH	1 stationärer ES Voltastrasse	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190814_111043
601S	1 stationärer ES Voltastrasse	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190814_110524
601Wb	1 stationärer ES Voltastrasse	Winter	r_p113p26m002v01_36_190814_110427
602FH	2 stationäre ES Voltastrasse	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190814_110550
602S	2 stationäre ES Voltastrasse	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190814_111021
602Wb	2 stationäre ES Voltastrasse	Winter	r_p113p26m002v01_36_190814_111004
701Wb	WR Aeschenplatz	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_112113
702Wb	WR Bad. Bahnhof	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_213423
703Wb	WR Birsbrücke	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_112403
704Wb	WR Bruderholz	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_212644
705Wb	WR Burgfelderstrasse	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_112940
706Wb	WR Dolderweg	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_214302
707Wb	WR Dreispitz	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_120755
708Wb	WR Leopoldshoehe	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_215706
709Wb	WR Margarethen	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_122621
710Wb	WR Mermoz Hurst	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_222821
711Wb	WR Morgarten	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_122342
712Wb	WR Nauenstrasse Süd	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_221645
713Wb	WR Niederholz	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_122521
714FH	WR Parkallee	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190808_112824
714S	WR Parkallee	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190808_113111
714Wb	WR Parkallee	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_222141
715Wb	WR Rheinpark	Winter	r_p113p26m002v01_36_190807_181848
716FH	WR Riehen	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190919_080442
716S	WR Riehen	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190919_080502
716Wb	WR Riehen	Winter	r_p113p26m002v01_36_190808_030448
717Wb	WR Rudolfstrasse	Winter	r_p113p26m002v01_36_190808_093829
718Wb	WR Sieglinweg	Winter	r_p113p26m002v01_36_190808_093847
719FH	WR St. Alban - Anlage	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190919_080411
719S	WR St. Alban - Anlage	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190919_080428
719Wb	WR St. Alban - Anlage	Winter	r_p113p26m002v01_36_190808_093909
720Wb	WR St. Jakob	Winter	r_p113p26m002v01_36_190808_093924
721Wb	WR St. Johann	Winter	r_p113p26m002v01_36_190808_093938
722Wb	WR Steinenbachgässlein	Winter	r_p113p26m002v01_36_190808_093953
723Wb	WR Viaduktstrasse	Winter	r_p113p26m002v01_36_190808_094007
724FH	WR Voltastrasse	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190809_105435
724S	WR Voltastrasse	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190809_105456
724Wb	WR Voltastrasse	Winter	r_p113p26m002v01_36_190808_094021
725Wb	WR Wiesenplatz	Winter	r_p113p26m002v01_36_190808_094040
707FH_SpG3	Speisegebiet 3 + WR Dreispitz	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190918_115731
707S_SpG3	Speisegebiet 3 + WR Dreispitz	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190918_120037

Version	Variante	Jahreszeit	Datenbank
707Wb_SpG3	Speisegebiet 3 + WR Dreispitz	Winter	r_p113p26m002v01_36_190918_140518
711FH_SpG2	Speisegebiet 2 + WR Morgarten	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190918_115630
711S_SpG2	Speisegebiet 2 + WR Morgarten	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190918_120015
711Wb_SpG2	Speisegebiet 2 + WR Morgarten	Winter	r_p113p26m002v01_36_190918_140435
724FH_SpG1	Speisegebiet 1 + WR Volta	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_190919_075655
724S_SpG1	Speisegebiet 1 + WR Volta	Sommer	r_p113p26m002v01_35_190919_075845
724Wb_SpG1	Speisegebiet 1 + WR Volta	Winter	r_p113p26m002v01_36_190919_075946
800FH	Gesamtvariante	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_191025_140117
800S	Gesamtvariante	Sommer	r_p113p26m002v01_35_191025_140155
800Wb	Gesamtvariante	Winter	r_p113p26m002v01_36_191025_140407
801FH_SpG1	Speisegebiet 1 + WR Volta	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_191024_091928
801S_SpG1	Speisegebiet 1 + WR Volta	Sommer	r_p113p26m002v01_35_191024_091952
801Wb_SpG1	Speisegebiet 1 + WR Volta	Winter	r_p113p26m002v01_36_191024_092006
802FH_SpG2	Speisegebiet 2 + WR Morgarten	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_191025_134330
802S_SpG2	Speisegebiet 2 + WR Morgarten	Sommer	r_p113p26m002v01_35_191025_134349
802Wb_SpG2	Speisegebiet 2 + WR Morgarten	Winter	r_p113p26m002v01_36_191025_134410
803FH_SpG3	Speisegebiet 3 + WR Dreispitz	Frühling/Herbst	r_p113p26m002v01_14_191025_134429
803S_SpG3	Speisegebiet 3 + WR Dreispitz	Sommer	r_p113p26m002v01_35_191025_134457
803Wb_SpG3	Speisegebiet 3 + WR Dreispitz	Winter	r_p113p26m002v01_36_191025_134517

Tabelle 3-3: Übersicht der durchgeführten FABEL-Simulationen

4 FABEL-MODELL

4.1 Grundmodell

Das bestehende FABEL-Modell war grundsätzlich dank den letzten BVB-Studien wie „Aktualisierung Gesamtnetzstudie“ oder Kurzschlussberechnungen auf dem aktuellen Stand und konnte deshalb für die Energiebetrachtungen als Basis verwendet werden. Die aktuellen Eingabedaten zum Modell sind im Bericht zur Gesamtnetzstudie (siehe [1]) beschrieben, weshalb auf eine ausführliche Beschreibung in vorliegendem Bericht verzichtet wird. Änderungen an diesem Grundmodell betrafen insbesondere die Bereiche Fahrzeuge, Fahrplan und Betrieb sowie die Ergänzung der Weichenheizungen. Diese für die Referenzsimulationen relevanten Eingabedaten sind nachfolgend beschrieben.

Unter Kapitel 4.6 sind die erforderlichen Erweiterungen des FABEL-Modells beschrieben, welche basierend auf den unterschiedlichen Energiesparmassnahmen notwendig waren.

4.2 Fahrzeugdaten

Das bestehende Modell beinhaltete bereits die Tramfahrzeuge Combino, Flexity und Tango (siehe [1]), musste aber noch mit zwei Cornichon-Varianten ergänzt werden: Einfachtraktion (ET) „Be 4/4 + B4S“ und Doppeltraktion (DT) „Be 4/4 + B4S + Be 4/4“. Diese sind nebst dem/den Antriebswagen je mit einem Zwischenwagen ausgerüstet. Die dazu berücksichtigten Eckdaten und Kennlinien basieren hauptsächlich auf Erfahrungswerten vergleichbarer Fahrzeuge und sind nachfolgende beschrieben.

4.2.1 Im Modell bereits vorhandene Fahrzeuge

Die Daten zu den Fahrzeugen Combino, Flexity und Tango (BLT) sind im Bericht zur Studie „Aktualisierung Gesamtnetzstudie“ [1] dokumentiert, weshalb in vorliegender Studie nur die Änderungen zum Grundmodell beschrieben sind.

Eine Änderung der bereits vorhandenen Fahrzeuge betraf die Werte für Beschleunigung und Ruck. Diese wurden unter Berücksichtigung einer mittleren Belastung für alle im Modell erfassten Fahrzeuge gleich gewählt:

- Mittlere Beschleunigung $a = 0.8 \text{ m/s}^2$
- Ruck $= 1.0 \text{ m/s}^3$

Weiter wurden für die Berechnungen bei allen Fahrzeugen dieselben Fahrwiderstandsparameter verwendet. In FABEL wird der Fahrwiderstand über die Parameter $w1$ - $w6$ definiert (nach dem Prinzip von Davis). Dabei gilt nachfolgende Formel:

$$F = \left(w1 + \frac{w4}{m} + (w2 + \frac{w5}{m}) \cdot \frac{v}{10} + (w3 + \frac{w6}{m}) \cdot \left(\frac{v}{10}\right)^2 \right) \cdot m \cdot g \text{ in [N]},$$

Formel 4-1: Fahrwiderstand in [N] nach Davis, wobei Masse m in [t] und Geschwindigkeit v in [km/h]. g steht für die Erdbeschleunigung [m/s^2].

Parameter	Einheit	Wert
w1	[N/kN]	4.00
w2	[N h/kN km]	0.00
w3	[N h ² /kN km ²]	0.00
w4	[N t/kN]	0.00
w5	[N t h/kN km]	0.65
w6	[N t h ² /kN km ²]	3.00

Tabelle 4-1: Abgeleitete Parameter für die Berechnung des Fahrwiderstands nach dem Prinzip von Davis

Nachfolgende Grafik zeigt die resultierenden Fahrwiderstände abhängig vom Gesamtgewicht und der Geschwindigkeit für jedes verwendete Fahrzeug im Modell:

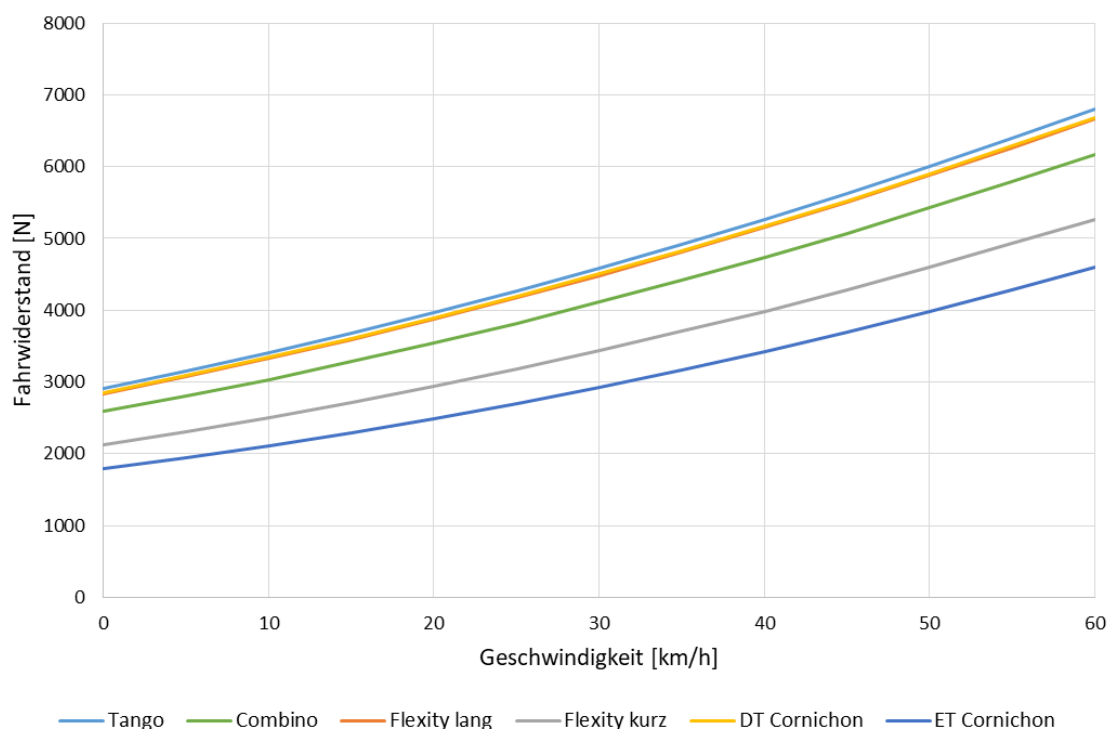


Abbildung 4-1: Grafik zum geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstandsverhalten der auf dem BVB-Netz verkehrenden Fahrzeuge

4.2.2 Cornichon-Tram (Be 4/4)

Im Unterschied zu den anderen Fahrzeugtypen ist das Cornichon nicht rückspeisefähig. In der Praxis wird die elektrische Bremsenergie daher fast ausschliesslich in den Bremswiderständen verheizt (ein kleiner Anteil für den Eigenbedarf). Zudem ist wahrscheinlich der pneumatische/mechanische Bremsanteil höher als bei den moderneren Fahrzeugen. Dazu waren jedoch seitens BVB keine Informationen vorhanden.

In vorliegender Studie wird die in den Bremswiderständen verheizte Energie grundsätzlich als die potentielle Energiesparmenge ausgewertet. Denn diese könnte ja von anderen Abnehmern oder Speichersystemen im Netz genutzt, respektive zwischengespeichert werden. Da nun aber das

Cornichon nicht rückspeisefähig ist, darf die hier verheizte Bremsenergie nicht als Sparpotential betrachtet werden. Denn ohne Rückspeisemöglichkeit kann sie nur dann genutzt werden, wenn sie auf dem Fahrzeug zwischengespeichert würde (siehe Massnahme mobile Energiespeicher in Kapitel 4.6.4). Eine Nachrüstung der bereits älteren Cornichon-Flotte (Baujahr 1986) ist jedoch aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wurde das Fahrzeug so parametrisiert, dass es nur mechanisch bremst und nicht elektrisch. Damit fällt auf den Cornichons keine rheostatische Bremsenergie, welche fälschlicherweise als Energiesparpotential ausgewertet würde.

Nachfolgend sind die Grundlagendaten und die verwendeten Kennlinien für die beiden berücksichtigten Cornichon-Kompositionen aufgeführt.

Parameter	Einheit	ET Cornichon	DT Cornichon
Länge	[m]	28	42
Leergewicht (Tara)	[t]	30.8	50.3
Nutzlast	[t]	14.9	22.3
Gesamtgewicht	[t]	45.7	72.6
rot. Masse	[%]	1.12	1.12
Maximale Geschwindigkeit	[km/h]	60	60
mittlere Beschleunigung	[m/s ²]	0.8	0.8
Ruck	[m/s ³]	1.0	1.0
Stromsystem	[V]	600	600
minimale Spannung	[V]	420	420
maximale Spannung	[V]	720	720
Spitzenleistung Antrieb	[kW]	400	800
Anfahrkraft	[kN]	80	160
Bremskraft	[kN]	80	160
Max. Traktions-Hilfsbetriebe	[kW]	0	0
Max. Leistung Heizung	[kW]	22	31

Tabelle 4-2: Grundlagen Cornichon als Einfachtraktion (ET) und Doppeltraktion (DT)

Zusätzliche Bemerkung: Im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen verfügt das Cornichon-Tram über keine Klimaanlage, weshalb in Tabelle 4-2 nur die Heizleistung angegeben ist. Das Prinzip der HLK ist in Kapitel 4.5 beschrieben.

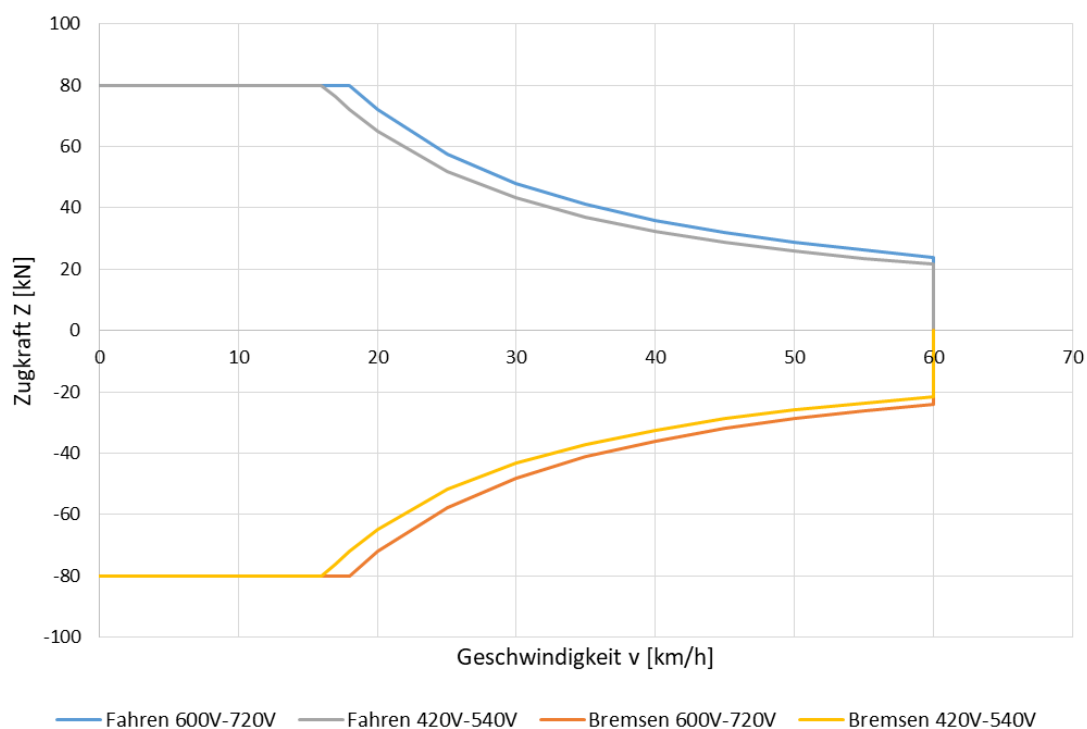


Abbildung 4-2: (Z-v)-Diagramm für das Cornichon-Tram (basierend auf Annahmen und Erfahrungswerten)

Tabelle 4-3 zeigt den in FABEL verwendeten geschwindigkeitsabhängigen Wirkungsgrad für das Cornichon-Tram (basierend auf Annahmen).

v [km/h]	η [%]
0	50%
5	65%
10	80%
15	85%
20	89%
25	91%
30	92%
35	92%
40	92%
45	92%
50	91%
55	91%
60	91%

Tabelle 4-3: Angenommener Wirkungsgrad des Traktionsstranges für das Cornichon-Tram

4.3 Weichenheizungen

Für die Untersuchung des Energieverbrauchs im BVB-Netz waren zusätzlich die vorhandenen Weichenheizungen mit zu berücksichtigen. Diese haben als konstante Verbraucher einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch und auf das Ergebnis der rheostatischen Bremsenergie (= ungenutzte Bremsenergie = Energiesparpotential), da sie im eingeschalteten Zustand als zusätzliche Abnehmer fungieren. Gemäss BVB sind pro Weiche (mechanisch und elektrisch) grundsätzlich zwei Weichenheizstäbe mit je 1 kW Leistung installiert. Für die Modellierung wurde der Weichenplan der BVB [8] als Grundlage der geografischen Verteilung der Weichenheizungen verwendet. Dabei wurden die jeweils nahe beieinander liegenden Weichenheizungen als Gruppen zu einem Verbraucher zusammengefasst. Insgesamt befinden sich rund 320 Weichenheizungen im BVB-Netz, welche während den Wintermonaten mit einer Leistung von total 640 kW einen Energiebedarf pro Tag von 15.4 MWh verursachen.

Gemäss BVB waren bis dato alle Weichenheizungen im BVB-Netz während den Winter-Monaten Oktober bis März konstant eingeschaltet, was einen relevanten Anteil an Energiebedarf verursacht. Als Verbraucher im Netz dienen die Weichenheizungen auch als Abnehmer von ungenutzter Bremsenergie, welche dadurch das Ergebnis zum eigentlichen Energiesparpotential verzerren.

Gemäss BVB sollen die Weichenheizungen nun künftig bedarfsabhängig gesteuert werden, was einer ersten Einschätzung von BVB zufolge einer Reduktion der Einsatzzeit von rund 2/3 bedeutet. Aus diesem Grund wurden für die Grundvariante (Normalzustand) zwei Wintersimulationen durchgeführt: einmal mit konstant eingeschalteten Weichenheizungen und einmal mit bedarfsgesteuerten Weichenheizungen, wobei die Einsatzzeiten wie folgt gewählt wurden: 04:00 – 08:00 Uhr und 20:00 – 24:00 Uhr (Reduktion der Einsatzzeit um 2/3).

4.4 Fahrplan und Betrieb

Für die Energieberechnungen sind grundsätzlich mittlere Belastungen zu berücksichtigen. Deshalb ist auch beim Fahrplan ein Betrieb abzubilden, welcher jahresbezogen möglichst einer durchschnittlichen Belastungsphase entspricht. Bei BVB kann grundsätzlich von folgenden Verkehrsphasen gesprochen werden: schwache Verkehrsauslastung zu Randzeiten jeweils frühmorgens und spätabends (Depotfahrten, ein- und auspendeln des Tagesverkehrs), Hauptverkehrszeit (HVZ) während je rund 2h morgens und abends und der „Normalbetrieb“ tagsüber zwischen den HVZ-Phasen.

Wie in der Einleitung (Kapitel 1) bemerkt, hat BVB durch die Messungen festgestellt, dass die Weichenheizungen einen relevanten Einfluss auf die vorhandene Rekuperationsenergie und somit auf das Energiesparpotential haben. Aus diesem Grund war es für vorliegende Analyse notwendig, einen ganzen Tag im Simulationsmodell abzubilden, inklusive Depotfahrten frühmorgens und spätabends. Denn insbesondere bei den Fahrten zu Randzeiten wird rekuperierte Bremsenergie von den Weichenheizungen genutzt und kann somit nicht als Energiesparpotential betrachtet werden. Als Basis für die Erstellung des Tages-Fahrplans wurden die grafischen Linienfahrpläne gültig für das Jahr 2018 für einen Wochentag (Montag – Donnerstag) [5] verwendet.

Jede Tramfahrt ist im Modell mit den folgenden Eigenschaften definiert: Abfahrtszeit und Route gemäss Fahrplan, Komposition, Auslastungsgrad und Haltezeiten an Haltestellen. Für die Simulationen wurde als Basis an jeder Haltestelle eine mittlere Haltezeit von 20 s angenommen. Um aber einen möglichst realistischen Betrieb zu berücksichtigen, wurden sowohl die Abfahrtszeiten wie auch die Haltezeiten

zusätzlich um einen zufälligen Wert variiert. So entsteht eine Vielzahl von unterschiedlichen Abstands- und Kreuzungskonstellationen im Trambetrieb.

Zufällige Variation bei

- Abfahrtszeiten: um -2s bis +10s
- Haltezeiten: um -5s bis +5s

Weiter wurden im Fahrplan auch die Lichtsignalanlagen (LSA) berücksichtigt. Diese waren im Modell bereits vorhanden. Es wurde dabei angenommen, dass ein Tram mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % an einem LSA-Standort halten muss. Die Haltezeit bei einer LSA ist wiederum zufällig generiert und liegt zwischen 3 s und 10 s.

Nachfolgende Übersicht zeigt den Einsatz der Fahrzeugtypen pro Linien (gemäss [6]):

Linie	Fahrzeugtyp
Linie 1/14	Flexity / Combino
Linie 10 (BLT)	Tango
Linie 11 (BLT)	Tango
Linie 15/16	Flexity kurz
Linie 17 (BLT)	Tango
Linie 2	Combino / Cornichon
Linie 21	Cornichon
Linie 3	Flexity lang
Linie 6	Flexity lang
Linie 8	Combino
Linie E11A (BLT)	Tango

Tabelle 4-4: Übersicht Fahrzeugeinsatz bei BVB

Gemäss einer statistischen Übersicht zur Fahrzeugauslastung von BVB [7] beträgt die mittlere Zuladung über alle Linien betrachtet rund 11 %. Da allerdings anzunehmen ist, dass im Stadtinnern die Fahrzeuge stärker ausgelastet sind als auf den Aussennetzstrecken, wurde das Netz als Vereinfachung in ein Aussen- und in ein Innennetzteil aufgeteilt, wobei im Stadtzentrum pauschal 15 % Fahrzeugauslastung verwendet wurde und auf den Aussennetzstrecken 7 %. Die zum Innennetz gehörigen Streckenabschnitte sind in nachfolgender Grafik orange markiert. Alle restlichen Streckenabschnitte gehören zum Aussennetz.

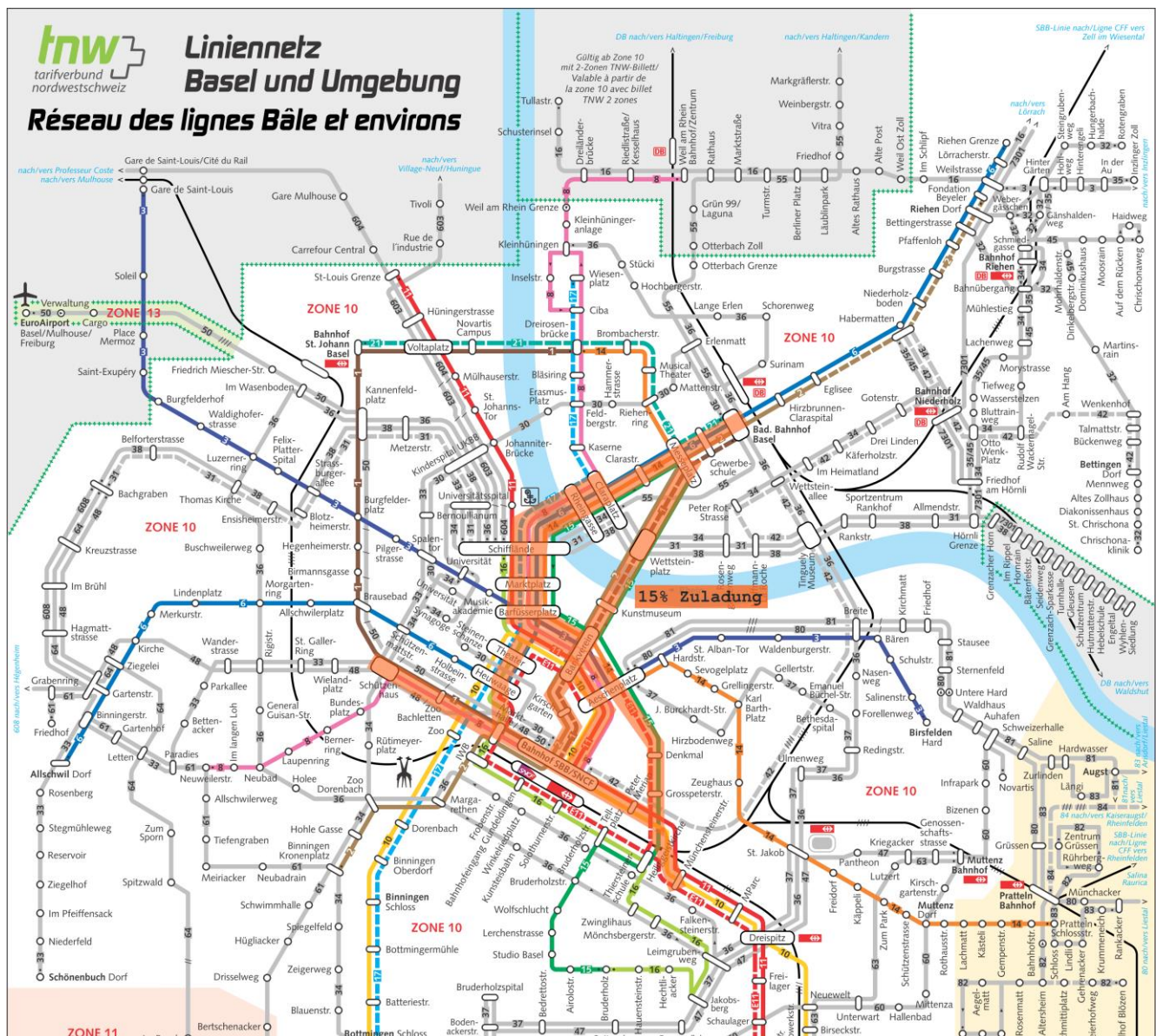


Abbildung 4-3: Übersicht BVB-Liniennetz mit der im Modell angesetzten Fahrzeugauslastung, Liniennetz BVB ab 2018 (orange markierte Streckenabschnitte gehören zum Innennetz mit einer Zuladung von 15 %)

4.5 Prinzip Hilfsbetriebe (HLK)

Die drei Simulationsvarianten Frühling/Herbst, Sommer und Winter unterscheiden sich hauptsächlich in der Leistung für die Hilfsbetriebe für Heizung, Lüftung und Klimaanlage (HLK). Wie bei den Weichenheizungen hat auch dieser Leistungsfaktor einen Einfluss sowohl auf den Gesamtenergieverbrauch, wie auch auf die ungenutzte Bremsenergie.

Die mittlere anwendbare Leistung für die Hilfsbetriebe wurde fahrzeugabhängig basierend auf Erfahrungswerten aus anderen Studien und in Bezug auf der installierten Leistung für Heizung und Klimageräte definiert. Diese Annahmen wurden anschliessend mit den Resultaten der von der BVB durchgeführten Fahrzeugmessungen aus dem Jahr 2017 [9] validiert. Siehe dazu Kapitel 6.2.

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die berücksichtigten HLK-Leistungen. Die angegebenen Werte in %, bezogen auf die installierte Leistung pro Fahrzeug, wurde der Einfachheit halber für jedes Tram angewendet. Die Cornichon-Tram verfügen über keine Klimaanlage.

Jahreszeit	HLK-Leistung in % der inst. Leistung	bestehend aus den Monaten
Frühling/Herbst	20 %	April, Mai, September, Oktober
Sommer	25 %	Juni, Juli, August
Winter	35 %	Januar, Februar, März, November, Dezember

Tabelle 4-5: berücksichtigte HLK-Leistung in [%] von der auf den Tram installierten Leistung

Fahrzeug	angewendete HLK-Leistung in [kW]		
	Frühling/Herbst	Sommer	Winter
Combino	18 kW	23 kW	32 kW
Tango	16 kW	15 kW	27 kW
Flexity lang	18 kW	23 kW	32 kW
Flexity kurz	12 kW	15 kW	21 kW
Cornichon ET	4 kW	keine Klima	8 kW
Cornichon DT	6 kW	keine Klima	11 kW

Tabelle 4-6: Übersicht der berücksichtigten HLK-Leistungen

4.6 Zusätzliche Anpassungen des Modells für die untersuchten Energiesparmassnahmen

4.6.1 Rechenbeispiel typischer Bremsvorgang

Als Grundlage für die Auslegung von Energiespeichersystemen vorab folgende Übersichtsrechnungen eines typischen Bremsvorgangs in einem leichten Gefälle. Zum einen fällt kinetische Energie an (durch den Bremsvorgang) und zum anderen potentielle Energie (durch das Gefälle).

- Ausgangsgeschwindigkeit $v = 40 \text{ km/h}$
- Verzögerung $a = 0.8 \text{ m/s}^2$
- Gewicht Fahrzeug $m = 49 \text{ t}$ (Combino mit 11 % Zuladung)
- Gefälle = 3 %

Der Bremsvorgang dauert: $t_{\text{Brems}} = \frac{v}{a} = 14 \text{ s}$. Liegt die komplette Bremsung in einem 3%-Gefälle, beträgt der dabei zurückgelegte Höhenunterschied: $h = -\frac{v^2}{2 \cdot a} \cdot 3\% = 2.4 \text{ m}$.

Die in dieser Zeit vernichtete potenzielle Energie beträgt demzufolge: $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h = 0.31 \text{ kWh}$

Die kinetische Energie lässt sich berechnen mit: $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = 0.84 \text{ kWh}$

Gesamtenergie Bremsvorgang: $E_{Brems} = E_{kin} + E_{pot} = 1.15 \text{ kWh}$

Soll ein kompletter Bremsvorgang von einem Tram mit einem mobilen Energiespeicher aufgenommen werden können, so muss dieser die oben errechneten 1.15 kWh (exklusiv Verluste) während den 14 s (Dauer Bremsphase) aufnehmen können. Dies ist somit nur dann möglich, wenn der Energiespeicher dieselbe Maximalleistung hat, wie das Fahrzeug. Ein Combino-Tram hat rund 1000 kW maximale Bremsleistung, was grundsätzlich einem Vielfachen eines heutigen Batteriespeichers entspricht. Entsprechend ist wahrscheinlich, dass auch mit einem Energiespeicher, welcher sich nahe an der zurückgewonnenen Bremsenergie befindet, das theoretisch vorhandene Energiesparpotential nicht vollständig genutzt werden kann.

4.6.2 Erhöhung Rekuperationsspannung

Beim elektrischen Bremsen wird grundsätzlich Energie in das Fahrleitungsnetz zurückgespeist, sofern Abnehmer vorhanden sind. Ist allerdings kein Verbraucher vorhanden, so steigt die Spannung im Netz an und das Fahrzeug beginnt rheostatisch zu bremsen. Das heisst, die vom Fahrzeug rekuperierte Energie wird über die Bremswiderstände verheizt. Die Massnahme Erhöhung der Rekuperationsspannung bringt somit den Vorteil, dass die Fahrzeuge in einer Bremsphase „länger“ Energie in das Fahrleitungsnetz zurückspeisen können und somit der Einflussbereich grösser wird. Das bedeutet, dass weiter entfernte Fahrzeuge oder Verbraucher die regenerierte Energie nutzen können.

Gemäss EN 50163 [11] beträgt die höchste nicht permanente Spannung U_{Max2} in einem 600 VDC-Netz 800 V. Dabei darf $U_{Max1} = 720 \text{ V}$ nicht länger als während maximal 5 Minuten überschritten werden. Die BVB-Tram sind heute aber derart konfiguriert, dass sie ab rund 720 V nicht mehr in das Fahrleitungsnetz zurückspeisen, sondern die regenerierte Bremsenergie in den Bremswiderständen verheizen (ausgenommen Cornichon, da gar nicht rückspeisefähig). Mit einer Erhöhung der Rekuperationsspannung bis 800 V, soll der Einfluss dieser Massnahme auf das Einsparen von Energie beziffert werden.

Eine Erhöhung der Spannung ist auf den modernen Fahrzeugen sicher technisch möglich. Es darf weiter davon ausgegangen werden, dass von der Energieversorgung her (Isolation) einer Erhöhung wohl auch nichts im Wege steht. Jedoch ist aber anzunehmen, dass die Alt-Fahrzeuge (Oldtimer) nicht für Spannungen bis 800 V ausgelegt sind. Die Machbarkeit ist jedoch durch BVB zu prüfen und nicht Inhalt der vorliegenden Studie.

Gegenüber dem Grundmodell für die Referenzsimulationen wurden in dieser Simulationsvariante demnach die Fahrzeugenkennlinie zum rheostatischen Bremsen so angepasst, dass alle BVB-Tram (Cornichon ausgenommen) bis 800 V zurückspeisen können und so die Reserve zwischen U_{max1} und U_{Max2} ausnutzen. Folgende Kennlinie wurde für alle Fahrzeuge in dieser Variante verwendet:

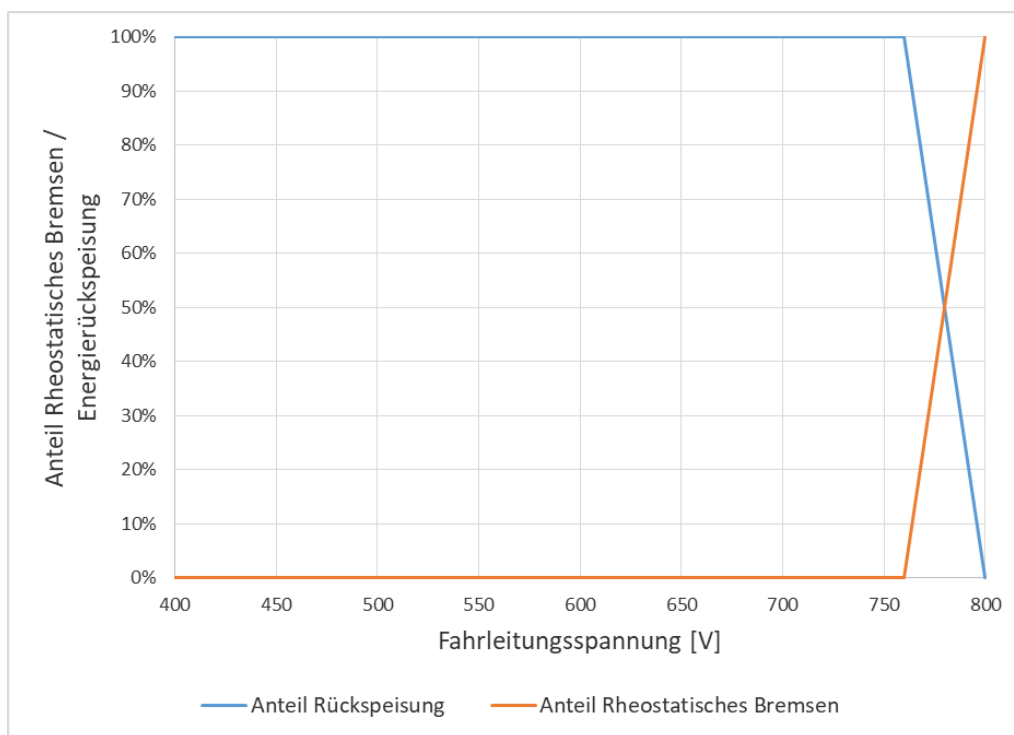


Abbildung 4-4: Kennlinie zum elektrischen Bremsen mit spannungsabhängigem Übergang von Rückspeisung zu rheostatischem Bremsen

4.6.3 Erhöhung Systemspannung auf $U_{\text{Nenn}} = 750 \text{ V}$

In einer weiteren Simulationsvariante wurde der Energiespar-Nutzen von der Erhöhung der Systemspannung von 600 V auf 750 V untersucht. Der nach EN 50163 [11] erlaubte Spannungsbereich liegt dabei zwischen 500 V und 1000 V.

Mit einer höheren Spannung werden die Ströme bei gleicher Leistung kleiner, weshalb auch die Verluste im Netz abnehmen. Zudem kann durch die höhere Spannung die Bremsenergie im Netz weiter „transportiert“ werden, weshalb tendenziell mehr Abnehmer erreicht werden sollten. Da aber der Leistungsbedarf durch die Verbraucher im Netz gleich bleibt, ist auch der Energieverbrauch durch die Verbraucher grundsätzlich gleich hoch.

Die simulatorische Untersuchung dieser Massnahme bedurfte folgende Anpassungen im FABEL-Modell: Einerseits die Anpassung der Gleichrichterspannung von standardmässig 640 V auf 822 V (Annahme basierend auf vergleichbaren Netze). Andererseits die Anpassung der Fahrzeugkennlinien ((Z-v)-Diagramm, Strombegrenzung, Wirkungsgrad, usw.) auf den höheren Spannungsbereich 500 V bis 1000 V, wobei der Leistungsbedarf der Fahrzeuge und der sonstigen Verbraucher unverändert ist. Es wurde davon ausgegangen, dass die Cornichon-Tram mit dieser Massnahme durch neue Fahrzeuge ersetzt werden müssten. Darum wurden auf den entsprechenden Linien Flexity-Tram eingesetzt. Damit ein Vergleich mit dem 600-V-Netz möglich ist, wurde zudem eine Simulation mit dem gleichen Betrieb, d.h. alles moderne Fahrzeuge, auch als Referenzvariante mit 600 V Nennspannung durchgeführt.

4.6.4 Mobile Energiespeicher

Eine weitere Möglichkeit zum Energiesparen ist der Einsatz von mobilen, fahrzeugseitigen Energiespeichern, also einem Batteriesystem welches auf dem Tram installiert und von diesem mitgeführt wird. Grosser Vorteil sind die geringen Verluste, da sich der Speicher nahe an der „Energiequelle“, respektive dem Verbraucher befindet, d.h. der Energiespeicher ist immer gerade dort, wo auch Bremsenergie anfällt oder wiederverwendet werden kann (im Gegensatz zum stationären Energiespeicher). Als Nachteil hingegen ist sicherlich das Gewicht zu bemerken, welches in jeder Beschleunigungsphase zu einem höheren Energieverbrauch führt sowie die grosse Stückzahl, da sämtliche Fahrzeuge ausgerüstet werden müssen.

Die Dimensionierung des Speichers wurde für die Netzsimulationen basierend auf einem existierenden und bei Trolleybussen eingesetzten Batteriespeicher sowie Erfahrungswerten und aktuellen Informationen aus dem Industriebereich gewählt. Allerdings muss bemerkt werden, dass die aktuell betriebenen Energiespeichersysteme bei Verkehrsbetrieben grundsätzlich nicht darauf ausgelegt sind, möglichst viel Energie zu sparen, sondern vielmehr um die Fahrleitungsspannung zu stabilisieren und / oder Fahrdrahtlos zu fahren und daher die Speicher eher grösser ausgelegt sind. Liegt aber das Ziel darin, Energie zu sparen, so muss die Auslegung, d.h. die Wahl der Speichergrösse, der Leistung sowie das Lade- / Entladeverhalten, an den Anwendungsfall angepasst werden.

Damit möglichst viel Bremsenergie zwischengespeichert und wieder genutzt werden kann, sind sowohl Kapazität als auch Leistung die beiden entscheidenden elektrischen Kenngrössen. Die Grundidee ist, dass die bei einer typischen Bremsung anfallende Bremsenergie im Speicher zwischengespeichert werden kann, in der Annahme, dass diese kurze Zeit später bei der Anfahrt gerade wieder verwendet wird. Bei einer Bremsung fällt während relativ kurzer Zeit eine relativ grosse Leistung an. Zudem soll die anfallende Bremsenergie bei den meisten „Talfahrten“ im Netz aufgenommen werden können. Gleichzeitig muss aufgrund des Gewichtes sollte Speichergrösse aber möglichst minimal ausfallen (so klein wie nötig).

Eine beispielhafte Berechnung eines Bremsvorgangs für ein Tram im BVB-Netz zeigt, dass im Mittel rund 1 kWh Energie anfallen (siehe Kapitel 4.6.1). Eine Analyse aus den Simulationen zeigt zudem, dass bei typischen Talfahrten maximal 5 kWh resultieren. Die Eruierung der optimalen Speichergrösse ist jedoch nicht Bestandteil der vorliegenden Studie. Hierfür, falls diese Massnahme umgesetzt werden soll, sind nachgelagert weitere Detail-Untersuchungen unter Berücksichtigung einer Grenznutzenanalyse nötig (d.h. Einsparung pro kWh installierte Kapazität mit den Investitionskosten gegenübergestellt). Aufgrund der Ergebnisse wird vermutet, dass sich diese ideale Kapazität im Bereich von 1 bis 5 kWh bewegt. Für die Betrachtungen wurde aber, damit keine Grenzwert-Effekte entstehen, einmal von einem genügend grossen Energiespeicher ausgegangen, d.h. ohne Obergrenze.

Das Gewicht des Speichers, welches primär auch durch die Kapazität dominiert wird, hat einen Einfluss auf die Energiebetrachtungen. Für die Annahme zum Gewicht wurde daher auf einer Speichergrösse (Kapazität) von 5 kWh basiert.

Für die Simulationen wurden für den Speicher initial folgende Parameter angenommen:

Nutzbare Kapazität: ∞ kWh (d.h. ohne Obergrenze)

Maximale Leistung: 360 kW (Strombegrenzung bei 500 A).

Gewicht: 1.0 t (eher sehr konservative Annahme, basierend für einen Speicher mit 5 kWh)

Das Verhalten des Speichers wurde derart parametrisiert, dass keine Energie in das Fahrleitungsnetz zurückgespeist oder daraus bezogen wird, sondern nur Bremsenergie aufnehmen kann und

anschliessend Energie ausschliesslich nur für den Eigenbedarf bei Antrieb und/oder Hilfsbetriebe (inkl. HLK) abgeben kann.

Für die Simulationen wurde flächendeckend bei allen BVB-Fahrzeugen ein mobiler Energiespeicher eingesetzt. Davon ausgenommen ist das Cornichon-Tram. Es wurde angenommen, dass eine Nachrüstung mit Energiespeichern für die Cornichon-Flotte für BVB aus wirtschaftlicher Sicht keine Option ist, weil die Fahrzeuge mit Jahrgang 1986 bereits relativ alt sind. Weiter wurden auch die Tango-Trams nicht mit Energiespeicher berücksichtigt, da dies BLT-Fahrzeuge sind und BVB über diese nicht entscheiden kann.

4.6.5 Fahrleitungsverstärkung mit 120mm² Feeder

Bisher ist im BVB-Netz für einen Doppelspurabschnitt standardmässig 2x107mm² Cu Fahrdraht (vom Stromabnehmer nicht bestrichen) als zusätzliche Verstärkung der Fahrleitung installiert. Mit dieser Variante soll der Nutzen hinsichtlich Energiesparen beim Einsatz von 2x120mm² Cu Seilen untersucht werden. Primär resultieren mit einem grösseren Querschnitt weniger Übertragungsverluste sowie kann aufgrund des kleineren Spannungsabfalls die Bremsenergie weiter „transportiert“ werden.

Die im FABEL hinterlegten spezifischen Fahrleitungsimpedanzen sind:

Bezeichnung	R' _{Hin} [Ω/km]
BVB Einfachspur mit 107mm ² Feeder	0.098
BVB Einfachspur mit 120mm ² Feeder	0.090
BVB Doppelspur mit 107mm ² Feeder	0.049
BVB Doppelspur mit 120mm ² Feeder	0.045

Tabelle 4-7: Übersicht spezifische Fahrleitungsimpedanzen im Hinleiterpfad (Fahrdraht & Feeder)

4.6.6 Stationärer Energiespeicher

Als eine weitere mögliche Energiesparmassnahme wurden ortsfeste Energiespeicher untersucht.

Ein solcher Speicher wird vorzugsweise bei einer Gleichrichterstation installiert mit Einspeisung direkt auf die Sammelschiene. Dies bringt den Vorteil, dass durch die Nähe zum Gleichrichter die Regelung abhängig der Spannung einfacher ist, sowie die für die Einspeisung nötigen Leistungsschalter und Fahrleitungsschutzgeräte bereits vorhanden sind.

Im Modell ist daher der Energiespeicher an die Sammelschiene einer ansonsten unveränderten Gleichrichteranlage angeschlossen. Für die Auslegung des Speichers dienen unter anderem auch die grundsätzlichen Überlegungen in Kapitel 4.6.1. Das Ziel muss sein, den Speicher so gross auszulegen, dass die anfallende ungenutzte Bremsenergie in den meisten Fällen aufgenommen werden kann. Der Speicher muss nicht für alle Extremfälle dimensioniert werden. Es ist nicht Ziel der vorliegenden Studie, den Speicher optimal auszulegen. Hierfür, falls diese Massnahme umgesetzt werden soll, sind nachgelagert weitere Detail-Untersuchungen unter Berücksichtigung einer Grenznutzenanalyse nötig (d.h. Einsparung pro kWh installierte Kapazität mit den Investitionskosten gegenübergestellt).

Nachfolgend sind die für das FABEL-Modell basierend auf Annahmen / Erfahrungswerten von bestehenden Systemen verwendeten Kenndaten und die Lade- / Entladekennlinie aufgeführt:

elektrische Kenngrösse	Wert	Einheit	Bemerkung
Leerlaufspannung U_0 des Gleichrichters	640	V	
0-Durchgang Kennlinie	650	V	Sollte höher als U_0 sein
nutzbare Energiemenge E_{nutzbar}	1.0	kWh	Siehe Kapitel 4.6.1
Maximale Leistung P_{Max}	450	kW	
Maximaler Strom I_{Max}	700	A	
Verluste (konstant angenommen)	100	W	

Tabelle 4-8: Kenndaten stationärer Energiespeicher

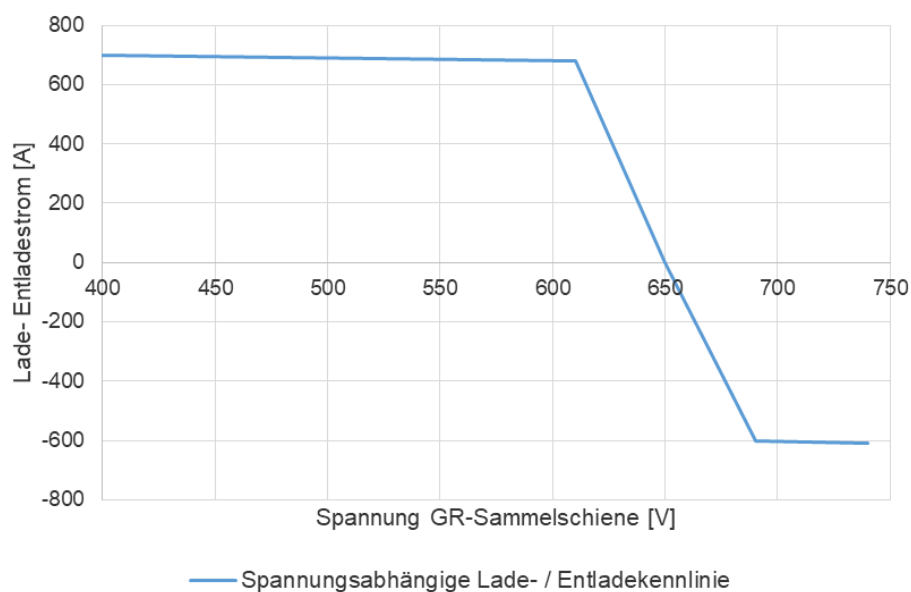


Abbildung 4-5: Kennlinie zum Lade- / Entladeverhalten des Energiespeichers abhängig von der GR-Spannung

4.6.7 Rückspeisefähiger Gleichrichter (Wechselrichter)

Für den rückspeisefähigen Gleichrichter wurde grundsätzlich dasselbe Verhalten angewendet wie bei den bereits im Modell vorhandenen Gleichrichter. Dementsprechend wurde die Leerlaufspannung, wie auch die Innenimpedanzen übernommen. Es gelten grundsätzlich:

$$U_0 = 640 \text{ V}$$

$$R_i = 19 \text{ m}\Omega$$

5 VORGEHEN BERECHNUNG ENERGIEVERBRAUCH

5.1 Grundsätzliches Vorgehen

In einem ersten Schritt wurden die Referenzsimulationen für die Energieverbrauchsrechnung der Grundvariante (100xx, ohne Massnahmen) durchgeführt. Dabei bilden 4 Simulationen je einen ganzen Betriebstag für die unterschiedlichen Jahreszeitperioden Frühling/Herbst, Sommer und Winter ab. Diese Simulationen unterscheiden sich in der berücksichtigten HLK-Leistung und der Einsatzzeit von den Weichenheizungen gemäss nachfolgender Tabelle. Mit den resultierenden Tageswerten sowie der Anzahl relevanter Tage pro Szenario wird anschliessend der Jahresenergieverbrauch hochgerechnet. Dabei gilt die Zuteilung der Monate zu den Szenarien/Jahreszeiten gemäss Tabelle 5-2.

Simulationsvariante	Szenario / Jahreszeit	HLK-Leistung	Weichenheizungen
100FH	Frühling/Herbst	20 %	aus
100S	Sommer	25 %	aus
100Wb	Winter	35 %	konstant ein
100Wk	Winter	35 %	bedarfsabhängig ein

Tabelle 5-1: Übersicht der Simulationen für die Grundvariante

Monat	Szenario / Jahreszeit	Anzahl Tage
Januar	Winter	31
Februar	Winter	28
März	Winter	31
April	Frühling/Herbst	30
Mai	Frühling/Herbst	31
Juni	Sommer	30
Juli	Sommer	31
August	Sommer	31
September	Frühling/Herbst	30
Oktober	Frühling/Herbst	31
November	Winter	30
Dezember	Winter	31

Tabelle 5-2: Zuteilung der Monate zu den Jahreszeiten und Anzahl Tag zur Hochrechnung auf das Jahr

Für die Hochrechnung der Tagesenergiewerte auf ein Jahr ergeben sich also: 122 Frühling/Herbst-Tage, 92 Sommer-Tage und 152 Winter-Tage. Dieses Prinzip zur Hochrechnung des Jahresenergieverbrauchs wurde für alle untersuchten Szenarien angewendet.

In einem nächsten Schritt wurden die unter Kapitel 4.6 beschriebenen Massnahmen zum Einsparen des Energieverbrauchs im BVB-Netz simulatorisch betrachtet. Zur Bewertung des Nutzens einer Massnahme wurde aus technischer Sicht bei der Resultatauswertung jeweils der Gesamtenergieverbrauch wie auch der Anteil ungenutzter Bremsenergie mit demjenigen aus der Grundvariante verglichen. Relevant für die Beurteilung des Sparpotentials ist jedoch nur die Differenz des Gesamtenergieverbrauchs.

Zudem wurden für die Variante Wechselrichter weitere Standorte mit zusätzlicher Anpassung des Netzsaltzustandes simuliert. Dabei wurden Speiseabschnitte zusammengeschaltet, um unter anderem den Wirkungsbereich des Wechselrichters zu erweitern. In einer weiteren Simulationsvariante wurde der Nutzen von drei erweiterten Speisegebieten, zwei Wechselrichtern, plus der Massnahme Erhöhung der Rekuperationsspannung untersucht. Diese Szenarien sind unter Kapitel 5.3 beschrieben.

5.2 Standortwahl für stationäre Energiespeicher und Wechselrichter

Wie bereits in Kapitel 4.6.6 geschrieben, sollte ein stationärer Energiespeicher vorzugsweise bei einer Gleichrichterstation installiert werden. Dabei kann direkt auf die Sammelschiene eingespeist werden. Dies bringt den Vorteil, dass durch die Nähe zum Gleichrichter die Regelung abhängig der Spannung einfacher ist sowie die für die Einspeisung nötigen Leistungsschalter und Fahrleitungsschutzgeräte bereits vorhanden sind.

Ein theoretisch optimal dimensionierter Energiespeicher weist grundsätzlich denselben Nutzen auf, wie ein Wechselrichter. Für die Dimensionierung eines Energiespeichers spielen die beiden elektrischen Kenngrössen Leistung und Kapazität eine entscheidende Rolle. Der Wechselrichter kann dabei als Energiespeicher mit unendlichem Füllstand angesehen werden. Dementsprechend ist das Verhalten der beiden Komponenten im Netz aus Sicht Energiesparen grundsätzlich gleich.

Für die Untersuchung des Energiesparpotentials wurde in einem ersten Schritt geprüft, welche Gleichrichter-Standorte aus technischer Sicht für einen Einsatz von stationären Energiespeichern oder Wechselrichtern am sinnvollsten sind. Ein erstes Indiz dafür ergab sich aus den Simulationen zur Grundvariante. Dabei wurde die geografische Verteilung der anfallenden rheostatischen Bremsenergie (also der ungenutzten Bremsenergie) im Netz betrachtet, was in nachfolgender Abbildung 5-1 dargestellt ist. Diese dient zudem auch zur Beantwortung der übergeordneten Frage: „Sind lokale Unterschiede zwischen Innenstadtbereiche und einzelnen Stichstrecken in den Aussenbezirken festzustellen?“

Nachfolgende Grafik zeigt, wo im BVB-Netz vermehrt rheostatische Bremsenergie anfällt. Je grösser die blauen Kreise, desto grösser der Anteil an verheizter Energiemenge. Tendenziell fällt auf den Aussennetzstrecken eher mehr ungenutzte Bremsenergie an, als im Innennetz. Die beiden Bereiche mit dem grössten Anteil verheizter Energie sind die Streckenabschnitte zwischen Brausebad - Allschwil und im Bereich Dreirosenbrücke. Die Bereiche sind nachfolgend rot eingekreist.

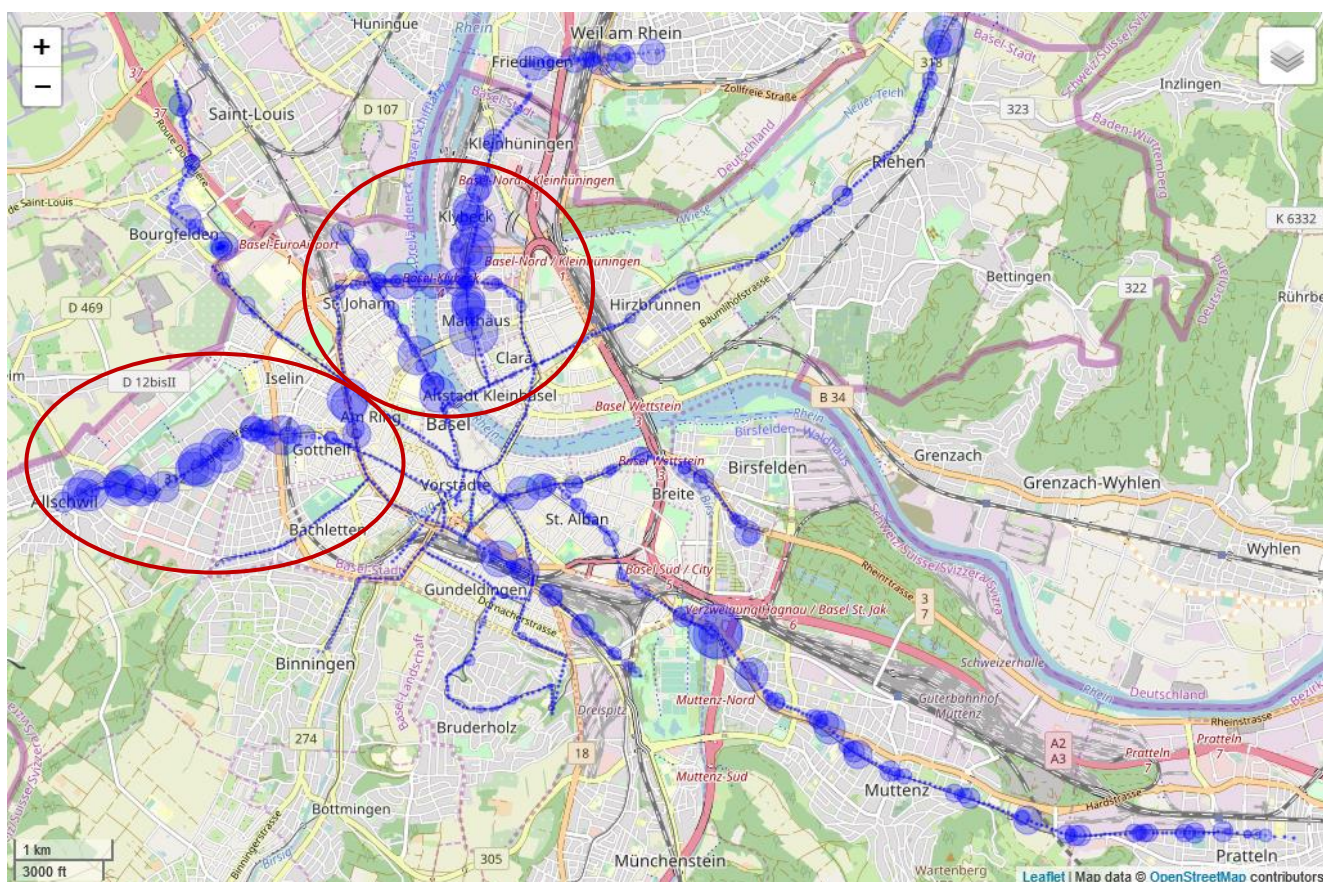


Abbildung 5-1: Grafik zur rheostatischen Bremsenergie im BVB-Netz basierend auf der Simulation 100FH (Grundvariante Frühling/Herbst), Je grösser die Kreise, desto grösser die anfallende Bremsenergie

Da die geografische Übersicht aber keine Informationen dazu liefert, welchen Anteil mit einem Wechselrichter oder Energiespeicher an einem bestehenden GR-Standort genutzt werden kann, wurden in einem zweiten Schritt für jeden Gleichrichterstandort eine Simulation durchgeführt, also total 25, in welchen jeweils an jedem Gleichrichterstandort im BVB-Netz ein Wechselrichter platziert wurde. Die Auswertung des Energiesparpotentials dieser Simulationen pro Standort in Abbildung 5-2 zeigt, an welchen Standorten am meisten gespart werden kann. Für deren Auswertung wurde jeweils der resultierende Gesamtenergieverbrauch pro Wintertag (Tagesenergieverbrauch) mit der Grundvariante verglichen.

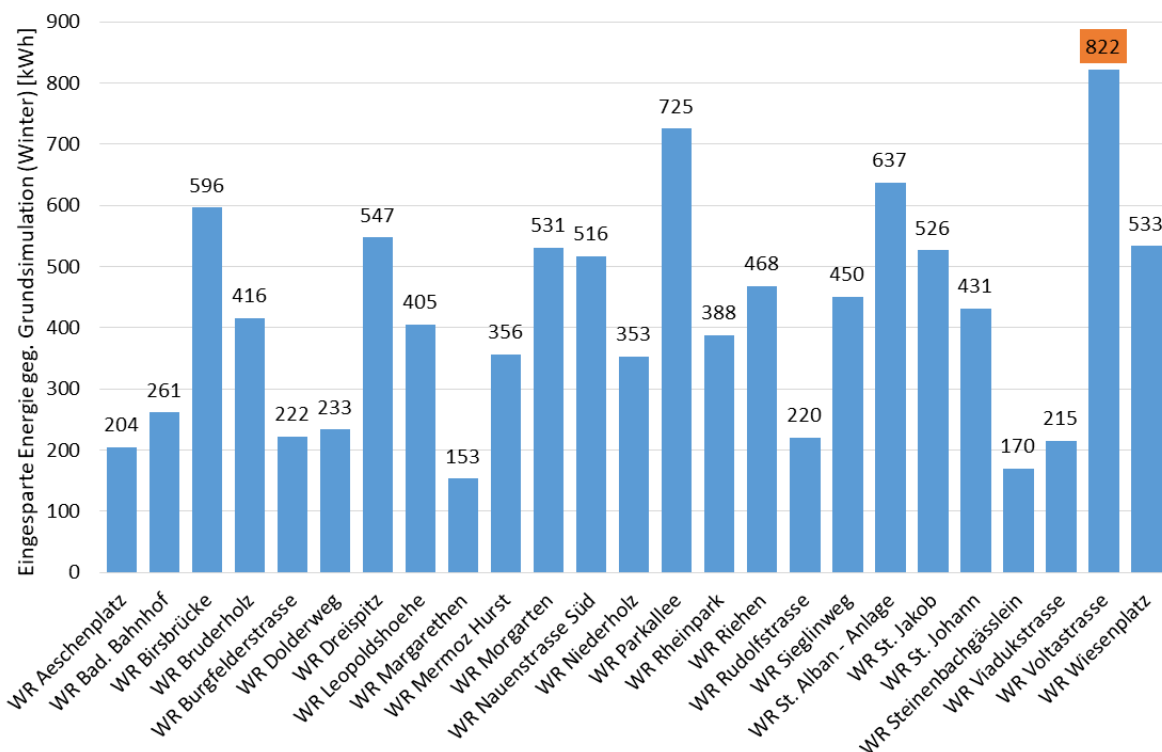


Abbildung 5-2: Vergleich Nutzen (eingesparte Energie) eines Wechselrichters an den bestehenden GR-Standorten (orange markiert der grösste Nutzen beim GR-Standort Voltastrasse)

Wie die Ergebnisse in der obigen Abbildung zeigen, liegt in den Standorte Parkallee und Voltastrasse das grösste Potential, wobei der Standort Voltastrasse mit 822 kWh pro Tag an der Spitze liegt. Dies deckt sich auch mit dem Bild in Abbildung 5-1, welches die beiden Regionen Brausebad - Allschwil sowie Dreirosenbrücke als diejenigen beziffert, bei welchen am meisten ungenutzte Bremsenergie anfällt.

Fazit zur Standortbestimmung: Ein Einsatz eines Wechselrichters oder eines Energiespeichers beim GR-Standort Voltastrasse bietet im Vergleich mit den anderen Standorten das grösste Energiesparpotential. Aus diesem Grund wurde für die Untersuchung der beiden Varianten in einem ersten Schritt der GR-Standort Voltastrasse berücksichtigt.

5.3 Erweiterte Speisegebiete mit und ohne Einsatz einer stationären Energiesparmassnahme

Basierend auf den Ergebnissen aus der ersten Simulationsreihe (siehe Kapitel 6.3.1) wurden gemeinsam mit BVB fünf Teilnetze (erweiterte Speisegebiete) definiert. In einem solchen Teilnetz wurden Speisesektoren mittels Änderungen von Schaltungen zusammengeschaltet, damit einerseits mehr Fahrzeuge die anfallende Bremsenergie nutzen können und andererseits, damit auch der Einflussbereich einer stationären Massnahme vergrössert werden kann.

Pro Speisegebiet wurde mit Simulationen in einem ersten Schritt der Nutzen der Schaltungen selbst und anschliessend in Kombination mit einem zusätzlichen Wechselrichter untersucht. Für jedes

Szenario wurden wiederum die drei Jahresperioden Frühling/Herbst, Sommer und Winter simuliert. Die betrachteten fünf Speisegebiete sind in Tabelle 5-3 und den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

In einer letzten Variante wurde eine Zusammenfassung von möglichen sinnvollen Massnahmen als eine mögliche Zukunftslösung simuliert. Dabei wurden die drei Speisegebiete Voltastrasse, Morgarten und Dreispitz erweitert, an den beiden Standorten St. Alban Anlage und Riehen je ein Wechselrichter (auch stationärer Energiespeicher möglich) eingesetzt sowie die Massnahme „Erhöhung der Rekuperationsspannung“ mitberücksichtigt (siehe Kapitel 4.6.2).

Netz	Schaltungen / Trennerzustände	Standort Wechselrichter
Speisegebiet 1	TR 309, TR30 und TR3 überbrücken	Voltastrasse
Speisegebiet 2	TR257 und TR 254 überbrücken	Morgarten
Speisegebiet 3	TR167 und TR158 überbrücken und TR 152 öffnen	Dreispitz
Speisegebiet 4	keine weiteren Schalthandlungen notwendig	St. Alban Anlage
Speisegebiet 5	keine weiteren Schalthandlungen notwendig	Riehen
alle Speisegebiete	alle obigen Schalthandlungen	St. Alban Anlage und Riehen

Tabelle 5-3: Übersicht der untersuchten Speisegebiete

Anmerkung: Beim Bilden der neuen zweiseitig gespeisten Abschnitte ist auf die Anforderungen seitens Fahrleitungsschutz gemäss Schutzkonzept zu achten. Dabei gilt, je länger ein solcher zweiseitig gespeister Abschnitt ist, desto schwieriger ist es, eine zuverlässige Detektion der möglichen Kurzschlüsse zu gewährleisten. Die Schaltungen wurden grob, basierend auf Erfahrungswerten aus den vorangegangenen BVB-Studien, hinsichtlich Schutz beurteilt. Eine umfassende Überprüfung mittels Kurzschlussbetrachtungen war allerdings nicht Inhalt dieser Studie.

5.3.1 Speisegebiet 1: Voltastrasse

Beim Speisegebiet 1 wird der Speisebereich gemäss Abbildung 5-3 erweitert. In einer weiteren Variante soll zudem ein Wechselrichter bei der Gleichrichterstation Voltastrasse berücksichtigt werden. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, ist an diesem Standort der grösste Nutzen für eine stationäre Energiesparmassnahme zu erwarten. Für die Erweiterung dieses Speisegebiets werden die Fahrleitungstrenner TR3, TR30 und TR309 überbrückt. Deshalb kann neu insbesondere die auf den, von den Gleichrichtern St. Johann, Dolderweg und Steinenbachgässlein gespeisten Streckenabschnitten anfallende Bremsenergie (gelb markiert), durch eine grössere Anzahl Fahrzeug genutzt werden. Der Wirkungsbereich geht sogar bis auf die weiter entfernten Strecken der GR-Anlagen Badischer Bahnhof und Burgfelderhof, auch wenn da nur noch ein geringer Effekt / Nutzen aufgrund der grossen Distanz zu erwarten ist.

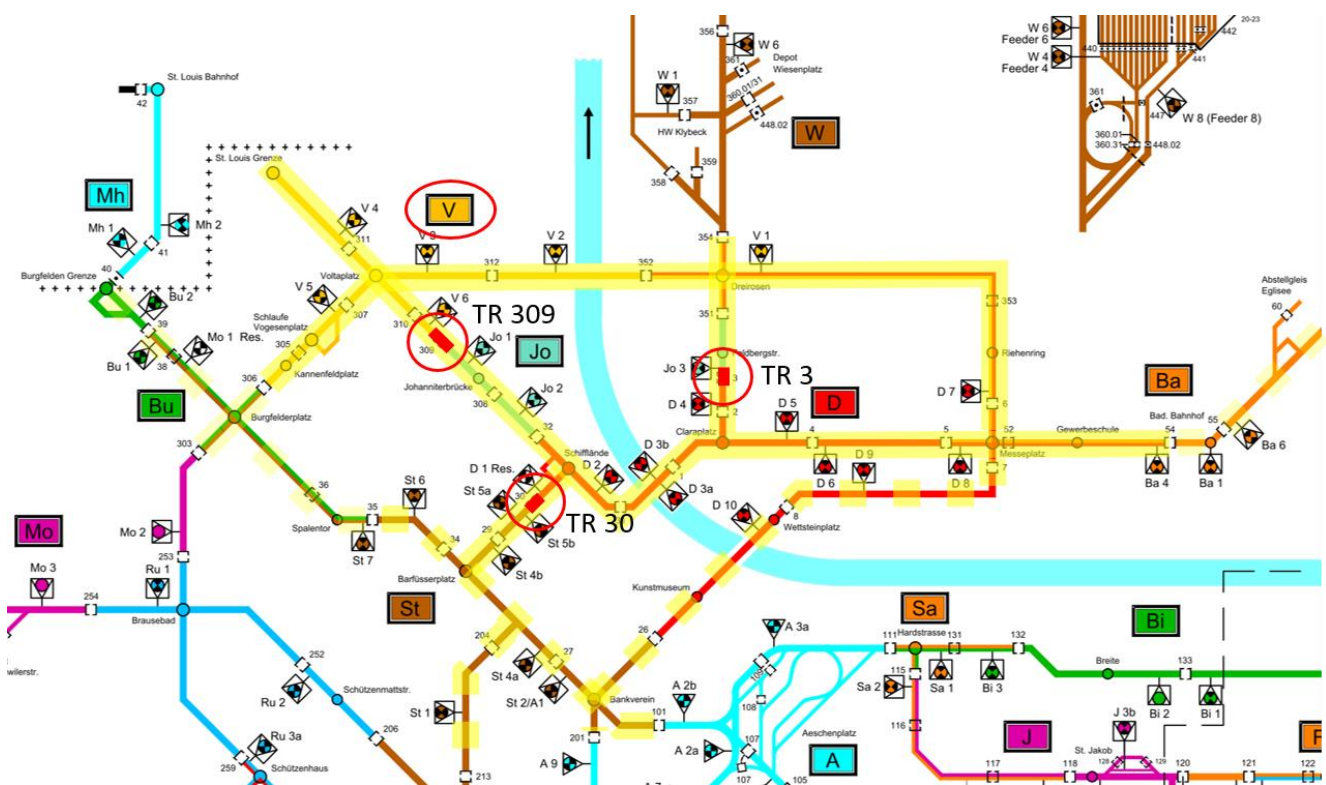


Abbildung 5-3: Speisegebiet 1 mit dem GR-Standort Voltastrasse als möglicher Standort für den Einsatz einer stationären Energiesparmassnahme (Wechselrichter oder Energiespeicher)

5.3.2 Speisegebiet 2: Morgarten

Ein zweites Speisegebiet eignet sich im Bereich des GR Morgarten. Dabei wird der Fahrleitungstrenner TR 254 überbrückt. Mit dieser Schalt-Massnahme wird erhofft, ein grösserer Anteil der anfallenden Bremsenergie rund um die Speiseabschnitte der Gleichrichter Rudolfstrasse und Morgarten nutzen zu können - ohne dass dabei eine aus schutztechnischer Sicht kritische Situation entsteht. Für den Einsatz einer stationären Energiesparmassnahme wurde in einer weiteren Simulation ein Wechselrichter beim GR-Standort Morgarten berücksichtigt.



Abbildung 5-4: Speisegebiet 2 mit dem GR-Standort Morgarten als möglicher Standort für den Einsatz einer stationären Energiesparmassnahme (Wechselrichter oder Energiespeicher)

5.3.3 Speisegebiet 3: Dreispitz

Ein drittes Speisegebiet wurde im Gebiet Dreispitz definiert. Dabei werden die Fahrleitungstrenner TR 167 und TR 158 überbrückt. Damit die Situation für die Speiseabgänge Dr1 und A6 schutztechnisch weiterhin unkritisch bleiben, muss zudem der TR 152 aktiv geschaltet werden. Mit diesen Schalthandlungen soll ein Grossteil der heute ungenutzten Bremsenergie in diesem Bereich nutzbar gemacht werden. Für die Variante erweitertes Speisegebiet mit Wechselrichter wurde der Standort GR Dreispitz definiert.

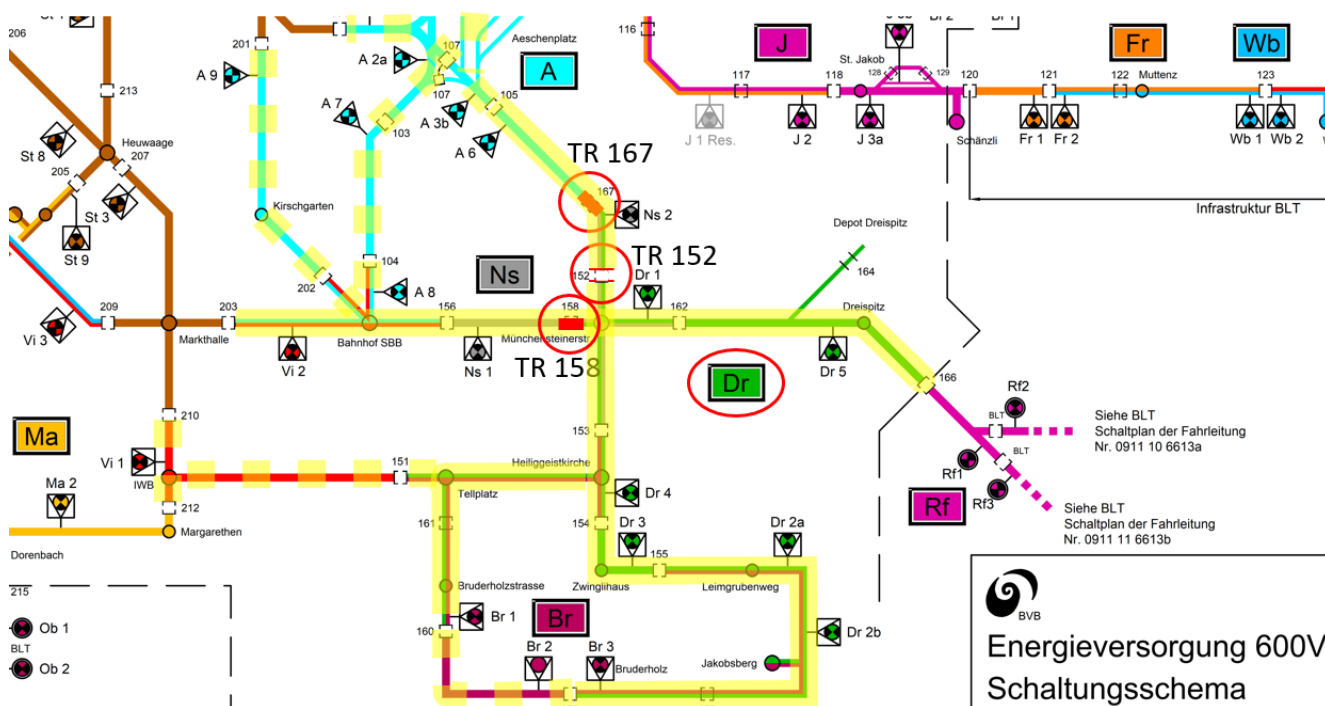


Abbildung 5-5: Speisegebiet 3 mit dem GR-Standort Dreispitz als möglicher Standort für den Einsatz einer stationären Energiesparmassnahme (Wechselrichter oder Energiespeicher)

5.3.4 Speisegebiet 4: WR St. Alban-Anlage

Für das vierte „betrachtete“ Speisegebiet im Bereich St. Alban sind keine zusätzlichen Zusammenschaltungen vorgesehen, da hier bereits heute die Fahrleitungsabschnitte über die Abgänge der Gleichrichter St. Alban, Birsfelden und St. Jakob zweiseitig gespeist werden. Ein Zusammenschalten mit der Anlage Aeschenplatz scheint aus Sicht Schutz eher kritisch und wurde daher in den Betrachtungen nicht berücksichtigt.

Da keine weiteren Schalthandlungen sinnvoll/notwendig sind, wurde für diese Simulationsvariante nur der Einsatz und Nutzen mit einer stationären Massnahme mittels Simulationen untersucht. Das vierte Speisegebiet berücksichtigt somit den Einsatz eines Wechselrichters in der bestehenden GR-Anlage St. Alban.

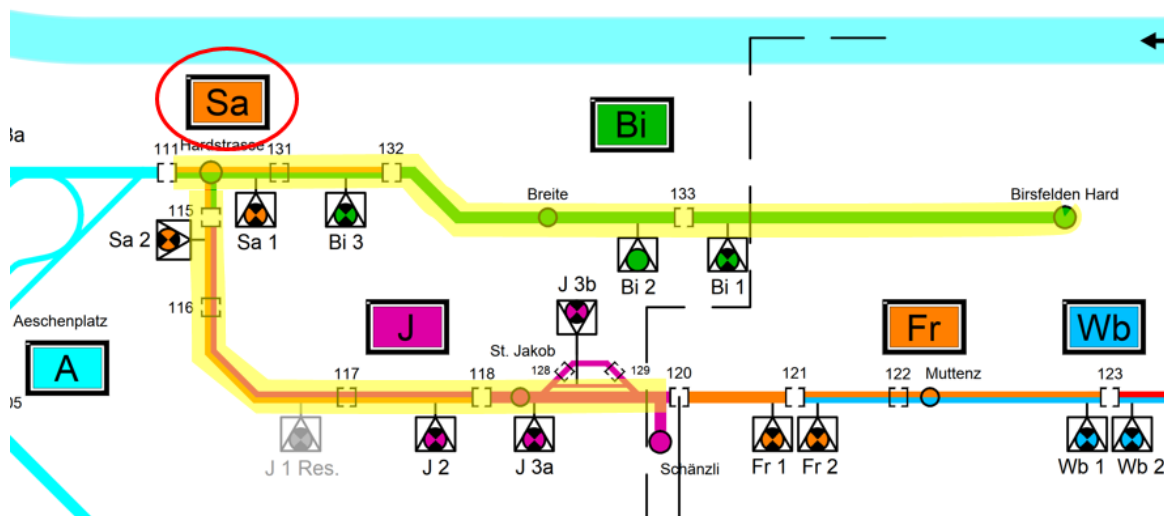


Abbildung 5-6: Speisegebiet 4 mit dem GR-Standort St. Alban-Anlage als möglicher Standort für den Einsatz einer stationären Energiesparmassnahme (Wechselrichter oder Energiespeicher)

5.3.5 Speisegebiet 5: WR Riehen

Das fünfte Speisegebiet befindet sich auf dem Streckenast Richtung Riehen. Seit dem Bau der GR-Anlage Sieglinweg werden alle Speiseabschnitte auf diesem Abschnitt zweiseitig gespeist. Damit ist auch dieses Teilnetz hinsichtlich einer Anpassung der Sektorierung für das Nutzen der ungenutzten Bremsenergie bereits optimiert. Es sind daher, wie beim Speisegebiet 4, keine weiteren Schalthandlungen sinnvoll/notwendig. Es steht somit auch hier das Potential einer stationären Energiesparmassnahme im Fokus. Hierfür wurde eine Wechselrichter-Anlage am GR-Standort Riehen betrachtet.

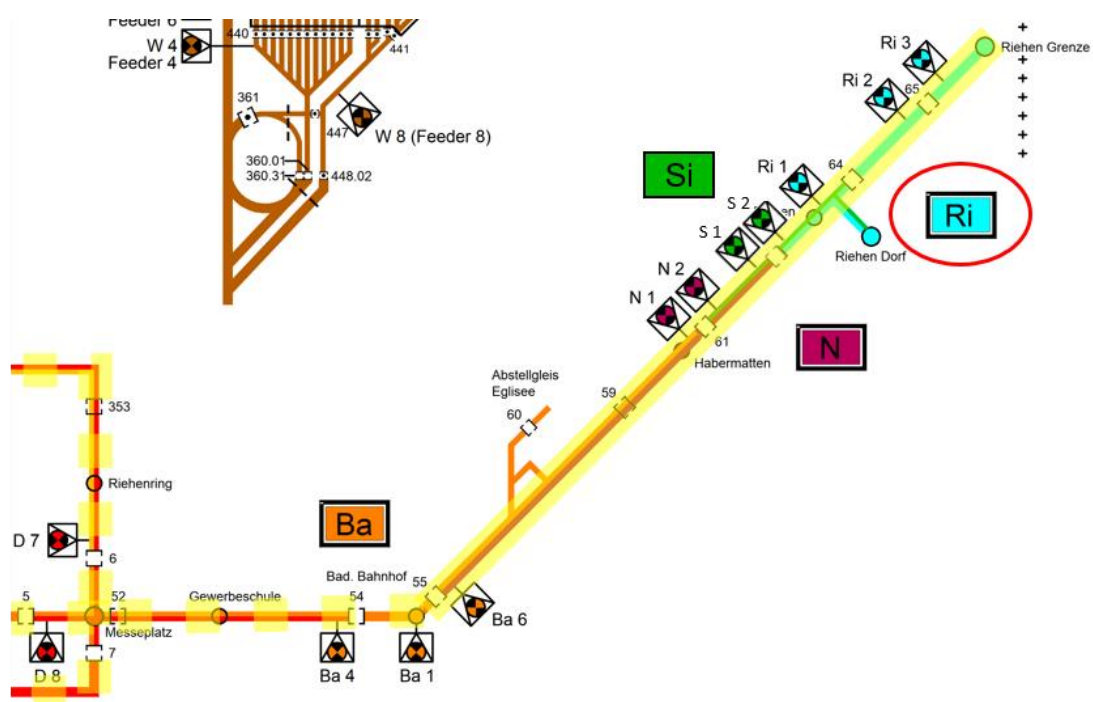


Abbildung 5-7: Speisegebiet 5 mit dem GR-Standort Riehen als möglicher Standort für den Einsatz einer stationären Energiesparmassnahme (Wechselrichter oder Energiespeicher)

6 ERGEBNISSE

6.1 Grundvariante

Für die Auswertung der einzelnen Simulationen wurden jeweils die elektrischen Grössen gemäss Tabelle 6-1 ausgewertet, wobei für vorliegende Untersuchung schlussendlich die rheostatische Bremsenergie, die regenerierte Energie und die bilanzierte Netzenergie relevant sind. Die ersten beiden Grössen „rheostatische Bremsenergie“ und „rückgespeiste Energie“ können auch als die „ungenutzte“ und „genutzte Energie“ bezeichnet werden und wurden jeweils in Bezug auf das im Netz total verfügbare Energiesparpotential ausgewertet. Die bilanzierte Netzenergie stellt den Gesamtenergieverbrauch im BVB-Netz dar.

Nachfolgende Tabelle zeigt die Rohdatenergebnisse der 4 Simulationen zur Grundvariante (ohne Massnahme), welche später als Basis zur Betrachtung des Nutzens der einzelnen Massnahmen dienen. In einem ersten Schritt interessiert der Einfluss / Unterschied zwischen den beiden Winter-Simulationen mit unterschiedlichen Einsatzzeiten der Weichenheizungen (siehe Kapitel 4.3).

Ergebnisse pro Simulationsvariante	100FH	100S	100Wk	100Wb
Anteil rheostatische Bremsenergie [kWh]	11758	11030	7919	8813
Anteil rückgespeiste Energie [kWh]	-31681	-31485	-32233	-31350
Totale Bremsenergie [kWh]	43'439	42'515	40'152	40'163
Bilanzierte Netzenergie [kWh] (Sicht Netz)	93192	97335	120933	113141

Tabelle 6-1: Resultattabelle zu den Simulationen der Grundvariante 100xx (FH: Frühling/Herbst; S = Sommer; Wk = Winter mit konstanter und Wb = Winter mit Bedarf gesteuerter Weichenheizung)

Hochgerechnet auf eine Jahreszeitperiode	100FH	100S	100Wk	100Wb
Anzahl Tage pro Jahr [d]	122	92	151	151
Ungenutzte Bremsenergie pro Periode [MWh]	1'434	1'015	1'196	1'331
Genutzte Bremsenergie pro Periode [MWh]	3'865	2'897	4'867	4'734
Verfügbare Bremsenergie pro Periode [MWh]	5'300	3'911	6'063	6'065
Anteil genutzter Bremsenergie [%]	73%	74%	80%	78%
Gesamtenergieverbrauch pro Periode [MWh]	11'369	8'955	18'261	17'084

Tabelle 6-2: Resultate zur Grundvariante hochgerechnet auf die Jahreszeitperioden Frühling/Herbst, Sommer und Winter für die relevanten Kenngrössen

Tabelle 6-3 zeigt zum einen die gesamte jährlich ungenutzte Bremsenergie in [MWh] und der Jahresgesamtenergieverbrauch, jeweils unter Berücksichtigung von konstant oder bedarfsabhängig eingeschalteten Weichenheizungen in der Wintersimulation.

Die jährlich ungenutzte Bremsenergie wird grundsätzlich als das im Netz vorhandene Energiesparpotential betrachtet. Das Ziel ist die Reduktion dieser in den Bremswiderständen verheizten Energie durch Energiesparmassnahmen. Tabelle 6-3 zeigt, dass rund 25 % der im BVB-Netz verfügbaren Bremsenergie heute nicht genutzt werden kann.

Wie bereits im Vorfeld der Studie durch BVB bemerkt und die Simulationen zeigen, kann mit den bis anhin im Winter konstant eingeschalteten Weichenheizungen insgesamt mehr Bremsenergie „genutzt“ werden, als wenn diese zukünftig bedarfsgesteuert sind: bei bedarfsabhängiger Weichenheizung nimmt die ungenutzte Bremsenergie um 135 MWh zu. Allerdings nimmt gleichzeitig aber der Jahresgesamtennergieverbrauch um 1'177 MWh (rund 3 %) ab.

Dieser Vergleich für die Grundvariante zeigt auch, dass eine Reduktion der ungenutzten Bremsenergie nicht direkt eine Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs bedeutet.

Hochgerechnet auf ein Jahr	mit Wh konstant	mit Wh bedarfsabhängig
Jährlich ungenutzte Bremsenergie [MWh]	3'645	3'780
Jährlich genutzte Bremsenergie [MWh]	11'629	11'496
Jährlich verfügbare Bremsenergie [MWh]	15'274	15'276
Anteil genutzter Bremsenergie	76%	75%
Jahresenergieverbrauch [MWh]	38'585	37'409

Tabelle 6-3: Resultate zur Grundvariante hochgerechnet auf ein Jahr

6.2 Vergleich mit BVB-Messungen – Validierung

Zur Validierung der Simulationsergebnisse konnte die von BVB erhaltene Grafik [10] mit dem monatlichen Gesamtenergieverbrauch von der IWB verwendet werden. Sie zeigt den monatlich durch BVB verursachten Energieverbrauch während den Jahren 2008 bis 2016.

Abbildung 6-1 zeigt den Vergleich zwischen den gemessenen und simulatorisch errechneten monatlichen Energieverbrauchswerten.

Verlauf monatlicher Gesamtenergieverbrauch

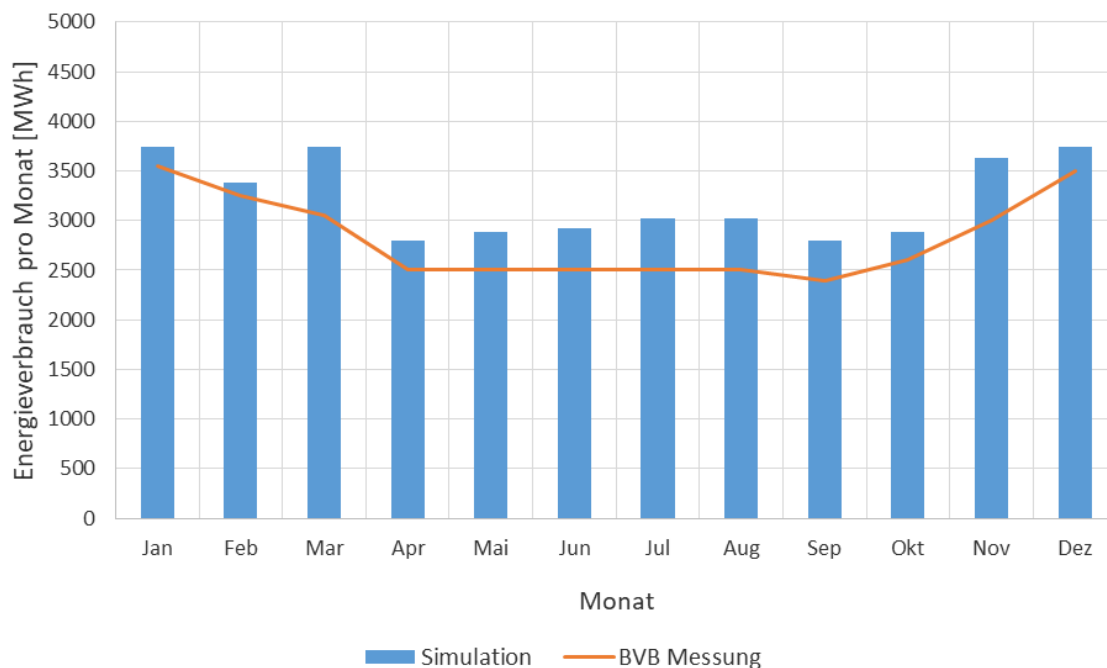


Abbildung 6-1: Vergleich des gemessenen und des simulatorisch errechneten monatlichen Energieverbrauchs der BVB

Die mittlere Abweichung zu den Messungen beträgt rund 8 % - die Werte in den Simulationen sind tendenziell zu hoch. Der Hauptgrund der Abweichung liegt vermutlich bei der in den Simulationen zu Grunde gelegten „straffen“ Fahrweise, der Ausnutzung der vorgegebenen Streckengeschwindigkeit und dem nicht berücksichtigen der reduzierten Fahrplandicht am Wochenende. In der Simulation wird bei jedem Anfahren und Bremsen jeweils die maximal mögliche Beschleunigung ausgenutzt. Zudem wird die stets bis zur definierten Streckengeschwindigkeit beschleunigt. In der Realität wird aber nicht immer „voll“ gefahren. Die Fahrer lassen das Tram zudem auch einmal ausrollen anstatt mit maximaler elektrischer Bremse zu bremsen (coasting). Zudem resultiert eine gewisse Ungenauigkeit, weil der Verbrauch der HLK-Hilfsbetriebe in den Simulationen nicht monatlich, sondern nur „Jahreszeitabhängig“ pauschal für Frühling/Herbst, Sommer und Winter unterschieden wurde (siehe Prinzip der HLK in Kapitel 4.5).

Dies zeigt auch die weitere Detailanalyse, bei welcher zusätzlich die spezifischen Energiewerte pro Fahrzeugtyp aus dem Dokument [9] verwendet wurden. Darin sind die Messwerte für die BVB-Tram Flexity lang, Flexity kurz und Combino aufgeführt. Abbildung 6-2 und Tabelle 6-4 zeigen beispielhaft einen Auszug mit den gemessenen mittleren Energiewerten von der Combino Flotte.

Tabelle 6-5 zeigt anschliessend als Übersicht die Gegenüberstellung der gemessenen zu den simulatorisch ermittelten Werten. Dabei fällt auf, dass in den Simulationen sowohl die bezogene wie auch die zurückgespeiste Energiewerte tendenziell höher sind als bei den gemessenen Werten. Allerdings liegen die Energieverbrauchswerte für Antrieb und Nebenbetriebe (HLK und Hilfsbetriebe Traktion) ziemlich nahe beieinander. Die Differenzen der Anteile bezogener und rückgespeicherter Energie neutralisieren sich in der Summe (Energiebilanz) grösstenteils.

Nebst der erwähnten Fahrweise würde eine unterschiedliche Traktionsmasse auch zu ähnlichen Abweichungen führen. Dass diese aber in dieser Grössenordnung zu hoch angesetzt wurde, ist eher

undenkbar, da ja grundsätzlich bereits eine relativ kleine mittlere Passagierzuladung gewählt wurde (siehe Kapitel 4.4) und noch tiefere Werte scheinen unplausibel.

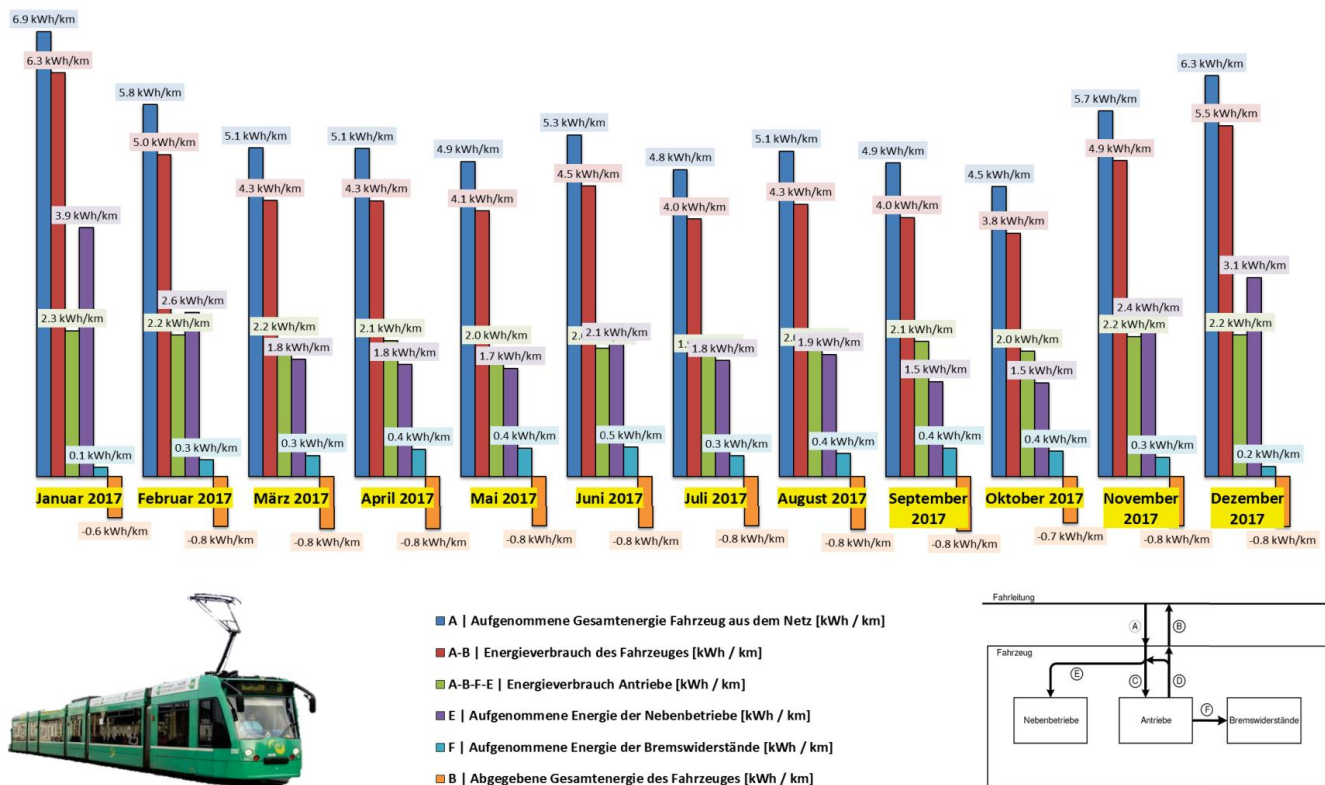


Abbildung 6-2: Ausschnitt aus dem Dokument „Energieverbrauch Betriebsfahrzeuge“ von BVB [9] mit den mittleren Energiebezügen der Combino Flotte als Beispiel

Monat	Energie bezogen (A)	Energie Bilanz (A-B)	Energie Antriebe (C)	Hilfsbetriebe (E)	Rheostatische Energie (F)	Energie zurück (B)
Jan	6.9	6.3	2.3	3.9	0.1	-0.6
Feb	5.8	5.0	2.2	2.6	0.3	-0.8
Mär	5.1	4.3	2.2	1.8	0.3	-0.8
April	5.1	4.3	2.1	1.8	0.4	-0.8
Mai	4.9	4.1	2.0	1.7	0.4	-0.8
Juni	5.3	4.5	2.0	2.1	0.5	-0.8
Juli	4.8	4.0	1.9	1.8	0.3	-0.8
Aug	5.1	4.3	2.0	1.9	0.4	-0.8
Sept	4.9	4.0	2.1	1.5	0.4	-0.8
Okt	4.5	3.8	2.0	1.5	0.4	-0.7
Nov	5.7	4.9	2.2	2.4	0.3	-0.8
Dez	6.3	5.5	2.2	3.1	0.2	-0.8

Tabelle 6-4: Tabellarische Form der aus dem Dokument „Energieverbrauch Betriebsfahrzeuge“ [9] verwendeten Messwerten in [kWh/km] beispielhaft für die Combino Flotte

	aufgenommene Gesamtenergie (A)		Energieverbrauch bilanziert Fzg (A-B)		Energieverbrauch Antriebe (C)		Energieverbrauch HLK (E)		Rheostatische Bremsenergie (F)		zurückgespeiste Energie (B)	
	Messung	simuliert	Messung	simuliert	Messung	simuliert	Messung	simuliert	Messung	simuliert	Messung	simuliert
Flexity Lang												
Frühling/Herbst	4.9	5.8	3.8	4.2	2.0	2.0	1.4	1.6	0.5	0.5	-1.2	-1.6
Sommer	5.3	6.0	4.1	4.5	2.0	2.0	1.7	1.9	0.4	0.5	-1.2	-1.6
Winter	6.0	6.5	4.9	4.9	2.1	2.0	2.6	2.4	0.2	0.4	-1.1	-1.6
Flexity kurz												
Frühling/Herbst	4.0	4.9	2.9	3.3	1.5	1.8	1.2	1.3	0.2	0.2	-1.1	-1.6
Sommer	4.3	5.1	3.1	3.5	1.6	1.8	1.4	1.5	0.1	0.2	-1.3	-1.5
Winter	4.6	5.5	3.6	3.9	1.5	1.8	2.0	2.0	0.1	0.1	-1.0	-1.5
Combino												
Frühling/Herbst	4.9	5.5	4.1	4.2	2.1	1.9	1.6	1.7	0.4	0.5	-0.8	-1.3
Sommer	5.1	5.8	4.3	4.5	2.0	1.9	1.9	2.0	0.4	0.5	-0.8	-1.3
Winter	6.0	6.3	5.2	4.9	2.2	1.9	2.8	2.6	0.2	0.3	-0.8	-1.4

Tabelle 6-5: Spezifischer Energieverbrauch [kWh/km] pro Fahrzeug gemessen und simuliert im Vergleich

6.3 Ergebnisse Energiesparmassnahmen – Schritt 1

6.3.1 Übersicht Resultate

Tabelle 6-6 zeigt die Ergebnisse der ersten untersuchten Energiesparmassnahmen. Dabei bilden die drei Grundvarianten die Basis für den Vergleich der eingesparten Energie pro untersuchte Massnahme.

- Grundvariante 1: Referenzsimulationen mit konstant eingeschalteten Weichenheizungen im Winter
- Grundvariante 2: Referenzsimulationen mit bedarfsgesteuerten Weichenheizungen im Winter
- Grundvariante 3: Referenzsimulationen ohne Cornichon (siehe Kapitel 4.6.3) und mit bedarfsgesteuerten Weichenheizungen im Winter

Abbildung 6-3 zeigt die pro Massnahme resultierende eingesparte Gesamtenergie zur entsprechenden Grundvariante. Abbildung 6-4 zeigt einen grafischen Vergleich der ungenutzten (rheostatischen) Bremsenergie.

Variante / Massnahme	Grundvariante 1 Wh konstant ein	Grundvariante 2 Wh bedarfs- abhängig ein	Grundvariante 3 ohne Cornichon- Tram (Kap. 4.6.3)	Erhöhung der Bremsspannung	Erhöhung der Nennspannung $U_N = 750 \text{ V}$	mobile Energiespeicher	Fahrleitungs- Verstärkung 120 mm^2 Feeder	stationärer ES Voltastrasse	WR Voltastrasse
Referenzvariante als Vergleich	-	1	2	2	3	2	2	2	2
Weichenheizung konstant / Bedarf gesteuert	k	b	b	b	b	b	b	b	b
Jahresenergieverbrauch [MWh]	38'585	37'409	37'344	37'203	36'695	34'534	37'279	37'152	37'051
Einsparung zur Grundvariante in [MWh]	-	1'177	64	205	649	2'875	130	257	358
<i>Einsparung zur Grundvariante in [%]</i>	-	3.1%	0.2%	0.5%	1.7%	7.7%	0.3%	0.7%	1.0%
Jährlich ungenutzte Bremsenergie [MWh]	3'645	3'780	3'825	3'533	3'577	845	3'751	3'518	3'414
Jährlich genutzte Bremsenergie [MWh]	11'629	11'496	11'843	11'741	12'096	2'897	11'526	11'756	11'860
Jährlich verfügbare Bremsenergie [MWh]	15'274	15'276	15'668	15'275	15'672	3'742	15'278	15'274	15'274
Anteil genutzter Bremsenergie in [%]	76%	75%	76%	77%	77%	77%	75%	77%	78%
Reduktion ungenutzte Bremsenergie zur Grundvariante [%]	-	-1%	-4%	7%	6%	78%	1%	7%	10%

Tabelle 6-6: Resultattabelle mit jährlichem Energieverbrauch und genutzter / ungenutzter Bremsenergie pro untersuchte Energiesparmassnahme

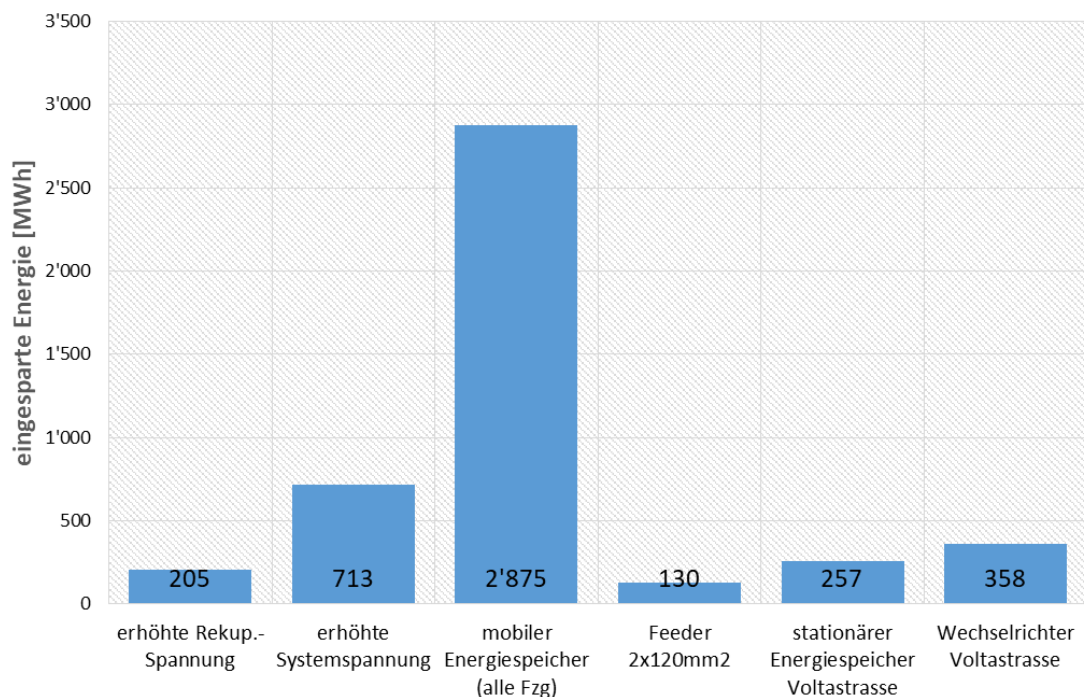


Abbildung 6-3: Grafik zur jährlich eingesparten Energie im MWh pro Energiesparmassnahme (die für den Vergleich jeweils relevante Grundvariante ist in Tabelle 6-2 angegeben)

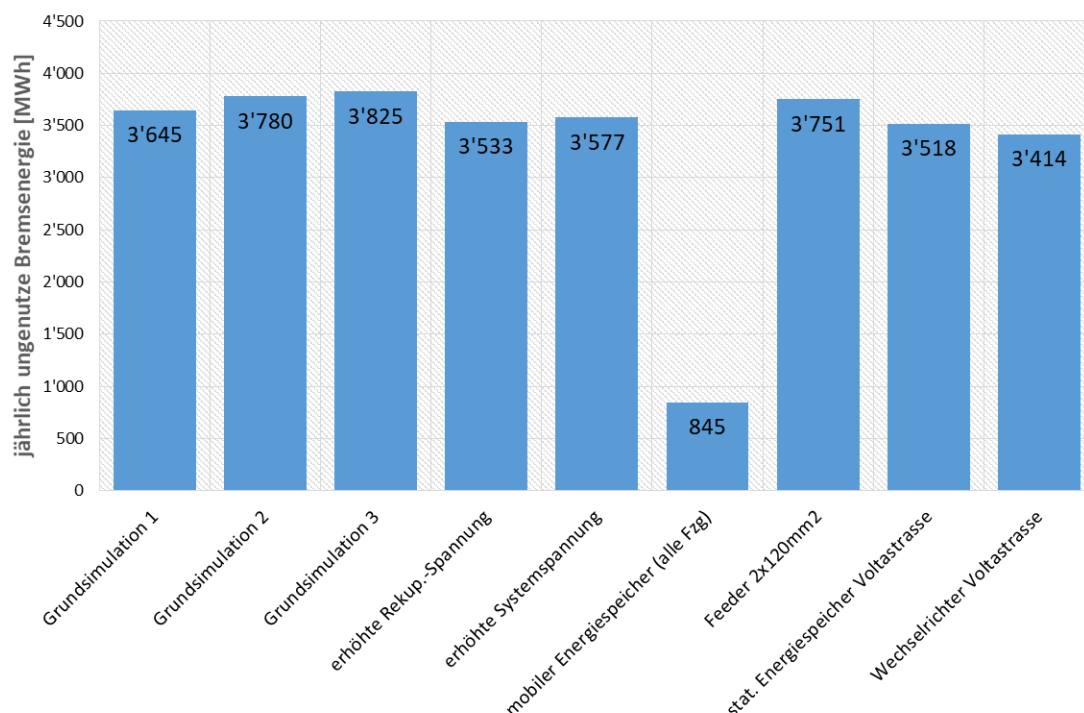


Abbildung 6-4: Grafik zur resultierenden jährlich ungenutzten Bremsenergie in MWh pro Energiesparmassnahme

6.3.2 Interpretation und Bemerkungen

6.3.2.1 Variante Erhöhung Rekuperationsspannung

Mit der Variante Erhöhung der Rekuperationsspannung kann gemäss den Simulationsergebnissen pro Jahr total 205 MWh vom Gesamtenergieverbrauch im BVB-Netz eingespart werden. Dies entspricht einer Reduktion von rund 0.5 %. Die rheostatische Bremsenergie kann dagegen um 247 MWh auf 3'533 MWh reduziert werden, was einer Reduktion von 7 % entspricht. Das heisst, es verbleibt immer noch ein namhafter Anteil ungenutzter Bremsenergie im Netz.

Der Grund, warum der Gesamtenergieverbrauch weniger stark reduziert werden kann, als die rheostatische Bremsenergie, sind die Verluste im Fahrleitungsnetz (42 MWh), welche mit der Umsetzung der Massnahme zu Buche fallen.

Nach EN 50163 [11] darf der Momentanwert der Spannung in einem 600 VDC-Netz den Grenzwert $U_{\max1} = 720 \text{ V}$ nicht länger als 5 Minuten überschreiten. Dank den häufigen Beschleunigungsphasen und nicht allzu langen Gefällen ist diese Anforderung beim BVB-Netz aber problemlos erfüllt. Denn praktisch bei jeder Abfahrt aus einer Haltestelle bewirkt der hohe Leistungsbedarf durch die Beschleunigung ein Absinken der Fahrleitungsspannung unter den Grenzwert 720 V. Nachfolgende Grafik zeigt beispielhaft den Verlauf der Fahrleitungsspannung am Stromabnehmer eines Zuges auf einem Abschnitt der Linie 14/1:

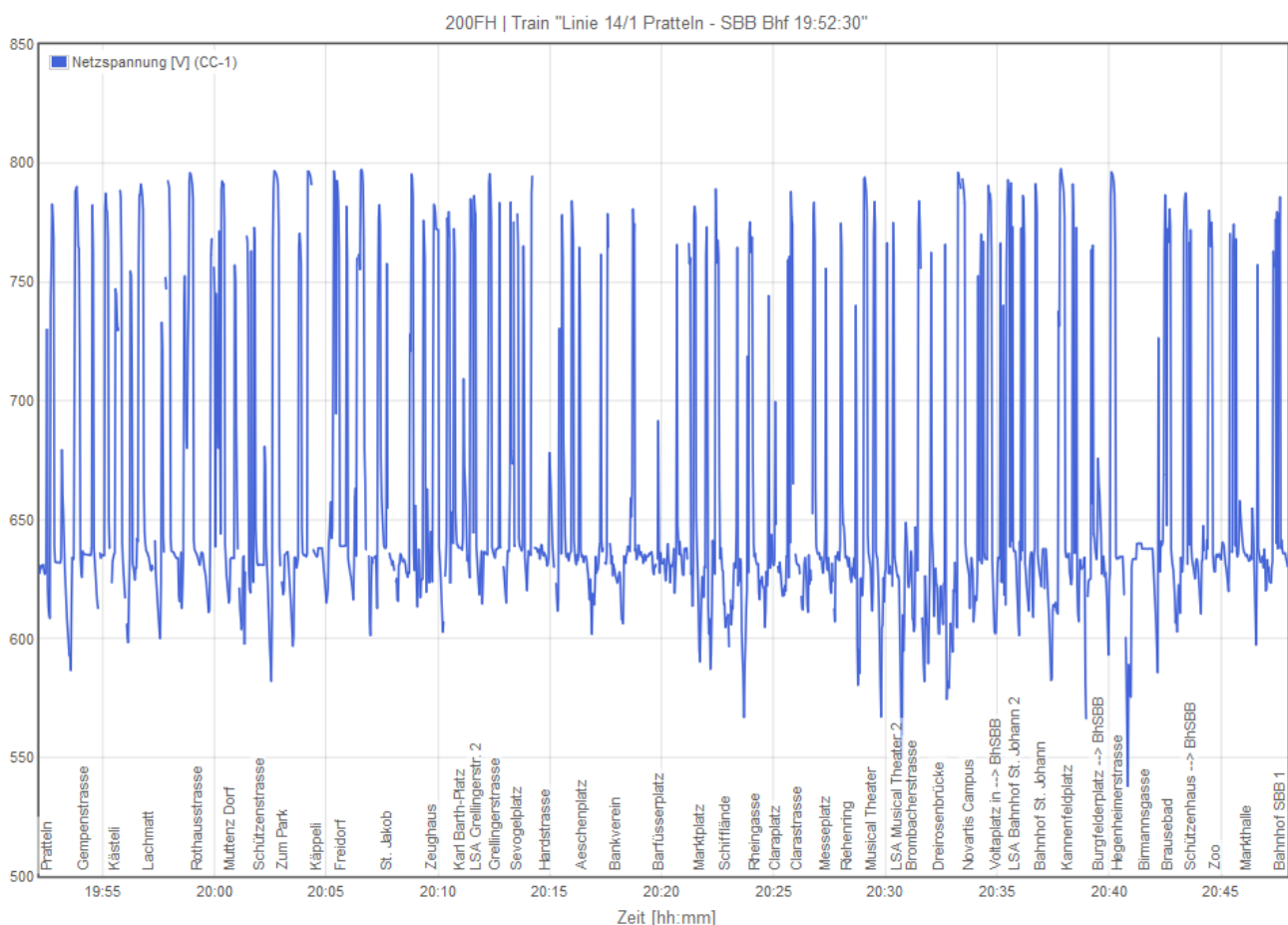


Abbildung 6-5: Ausschnitt der Fahrleitungsspannung beispielhaft auf der Linie 14/1 zwischen Aeschenplatz und SBB Bahnhof

6.3.2.2 Variante Erhöhung Systemspannung auf $U_{\text{Nenn}} = 750 \text{ V}$

Wie in Kapitel 4.6.3 beschrieben, wurde für den Vergleich mit der Massnahme „Erhöhung der Systemspannung auf 750 V“ zusätzliche Referenzsimulationen (Grundvariante 3 gemäss Kapitel 6.3.1) durchgeführt. Der Grund liegt in der Annahme, dass mit dieser Änderung die Cornichon-Fahrzeuge nicht mehr verwendet werden könnten und deshalb durch Flexity's (oder vergleichbaren Trams) ersetzt würden. Für die Bestimmung der eingesparten Energie wurde somit die Grundvariante 3 als Referenz verwendet.

Mit Erhöhung der Systemspannung auf 750 V kann total 649 MWh an Energie eingespart werden. Die ungenutzte Bremsenergie wird dabei um 248 MWh reduziert, was einer Reduktion um 5 % entspricht. Das heisst, es verbleibt mit dieser Massnahme immer noch ein namhafter Anteil ungenutzter Bremsenergie im Netz. Die restlichen rund 400 MWh, die eingespart werden, resultieren aufgrund der geringeren Netzverluste, da bei höherer Spannung tiefere Ströme resultieren.

Mit dieser Grundvariante 3 kann im Vergleich zur Grundvariante 1 auch die Frage zur „Reserve betreffend Anzahl rekuperierenden Fahrzeugen, wenn angenommen wird, dass zusätzliche Beschaffungen von Fahrzeugen gleicher Bauart erfolgen?“ beantwortet werden. Mit dem Ersatz der alten Cornichon-Trams nimmt der totale Energieverbrauch sogar leicht ab (0.3 %). Gleichzeitig nimmt aber das Potential ungenutzter Bremsenergie um 5 % zu. Das heisst, bei einem Ersatz der alten Fahrzeuge würde insgesamt 5 % mehr ungenutzte Bremsenergie zur Nutzung durch Massnahmen zur Verfügung stehen.

6.3.2.3 Variante mobile Energiespeicher

Die Grafiken zu der jährlich eingesparten Energie und der ungenutzten Bremsenergie (Abbildung 6-3 Abbildung 6-4) zeigen deutlich, dass die Variante mobiler Energiespeicher mit 2'875 MWh das grösste Potential zum Energiesparen aufweist. Verglichen zur Grundvariante entspricht dies einer Einsparung von rund 8 %. Die ungenutzte Bremsenergie kann auf 845 MWh reduziert werden, was einer Reduktion um 82 % entspricht.

Die Auswertung der Simulationen hat gezeigt, dass die BLT-Tram für einen grossen Anteil dieser noch restlichen Bremsenergie verantwortlich sind. Diese verkehren im BVB-Netz und wurden für vorliegende Betrachtung aber nicht mit Energiespeichern ausgerüstet. Jährlich fallen bei den Tango insgesamt 776 MWh an rheostatischer und somit ungenutzter Bremsenergie an. Die übrigen knapp 70 MWh werden weiterhin als rheostatische Bremsenergie auf den BVB-Fahrzeugen verheizt. Somit kann mit dem verwendeten Batteriespeicher (siehe Kapitel 4.6.4) im Vergleich zur Grundvariante 98 %, also praktisch die gesamten ungenutzte Bremsenergie, genutzt werden (inklusive der für BVB nicht nutzbaren Bremsenergie durch die BLT-Fahrzeuge).

Aus technischer Sicht ist dies eine sehr effiziente Massnahme. Nebst der technischen und ökologischen Sichtweise sind natürlich aber auch die notwendigen Investitionen zu betrachten, denn die Nachrüstung betrifft die ganze BVB-Flotte. Mehr dazu in Kapitel 7.4.

6.3.2.4 Variante Fahrleitungsverstärkung mit 120mm² Feeder

Mit der Massnahme Fahrleitungsverstärkung werden die heute im BVB-Netz verwendeten 107 mm² Cu Feeder mit 120 mm² Cu ersetzt. Bei einer flächendeckenden Umsetzung dieser Massnahme kann der Energieverbrauch im Netz insgesamt um 130 MWh pro Jahr gesenkt werden. Dabei werden, wie bereits in Kapitel 4.6.5 bemerkt, durch den tieferen Fahrleitungswiderstand vor allem die Netzverluste reduziert. Gemäss Simulationsergebnisse beträgt da die Differenz zur Grundvariante rund 100 MWh. Die Reduktion der rheostatischen Bremsenergie liegt hingegen bei knapp 30 MWh, was einer

Reduktion um 3 % entspricht. Das heisst, es verbleibt mit dieser Massnahme immer noch ein namhafter Anteil ungenutzter Bremsenergie im Netz.

6.3.2.5 Varianten stationärer Energiespeicher und Wechselrichter

Für die Varianten stationärer Energiespeicher und Wechselrichter wurde das in Kapitel 5.2 beschriebene Vorgehen angewendet. Die Simulationsergebnisse haben dabei gezeigt, dass ein Einsatz eines Energiespeichers oder eines Wechselrichters am GR-Standort Voltastrasse die grössten Energie-Einsparungen bringt.

Mit einem Wechselrichter am GR-Standort Voltastrasse kann verglichen mit der Grundvariante jährlich 358 MWh an Gesamtenergie eingespart werden kann. Gleichzeitig wird die jährlich ungenutzte Bremsenergie um 336 MWh gesenkt, was einer Reduzierung um 10 % entspricht.

Mit der berücksichtigten Konfiguration des Energiespeichers beträgt die berechnete, eingesparte Energie jährlich 257 MWh sowie eine Reduktion der ungenutzten Bremsenergie um 262 MWh. Somit kann diese Variante eines Energiespeichers gegenüber einem Wechselrichter nur einen Anteil von rund 72 % abdecken. Grund dafür ist die begrenzte Leistung des Energiespeichers: ein ideal ausgelegter Energiespeicher, d.h. genügend Leistung und Kapazität, weist grundsätzlich das gleiche Potential auf, wie der Wechselrichter.

Um dies detaillierter aufzuzeigen, wurde mit einer weiteren Simulation am Standort Voltastrasse ein zweiter Energiespeicher eingefügt. Diese Variante entspricht einer Verdoppelung von Kapazität und Leistung des Speichers. Nachfolgende Grafik zeigt den Füllstandverlauf der Energiespeicher aus den Simulationen mit einem (blau) sowie mit zwei (orange) Energiespeichern am Standort Voltastrasse (Kapazität je 1 kWh). Die eingesparte Energie beträgt dabei 327 MWh gegenüber der Grundvariante, was gegenüber dem Wechselrichter bereits einem Anteil von 91 % entspricht. Das heisst, einzelne Lastspitzen konnten auch mit zwei Energiespeichern nicht aufgenommen werden, was in nachfolgender Abbildung zu sehen ist. Die Frage ist jedoch, ob aus wirtschaftlicher Sicht eine Speicherlösung diese Spitzen wirklich ebenfalls abdecken muss (Kosten Nutzen). Die optimale Auslegung eines Speichers ist jedoch nicht Thema der vorliegenden Studie.

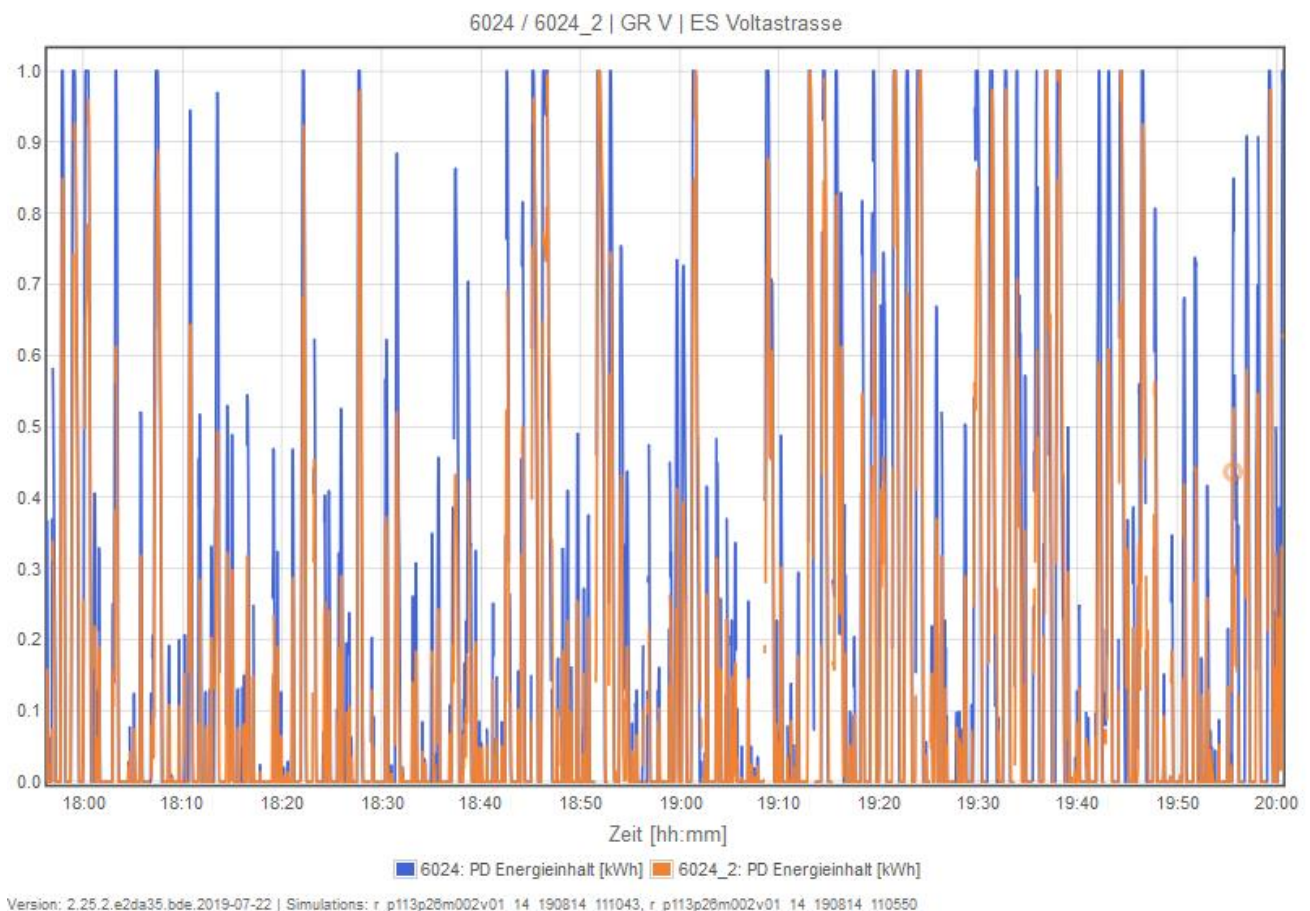


Abbildung 6-6: Füllstandverlauf in der Abendspitze aus den Simulationen mit einem (blau) und mit zwei Energiespeichern (orange) am Standort Voltastrasse

Wie erwähnt, kann mit nur einer Anlage im Netz aufgrund des eingeschränkten Wirkungsbereichs nur ein Teil der ungenutzten Bremsenergie reduziert werden (ca. 10 % beim GR Voltastrasse).

Wie die Ergebnisse zur Wahl des Standortes in Kapitel 5.2 aber auch zeigen, ist das Sparpotential an einigen Standorten eher gering. Hinzu kommt, dass viele Speisesektoren im BVB-Netz nur einseitig gespeist werden und so jeweils nur wenige Abnehmer auf demselben Speiseabschnitt vorhanden sind. Zudem ist der Wirkungsbereich eines Wechselrichters oder stationären Energiespeichers beschränkt. Mit neuer Sektorbildung, das heisst Zusammenschalten einzelner Sektoren über 2-seitige Sektorspeisungen zu grösseren Teilnetzen, wird eine weitere erhebliche Optimierung erreicht. Wie die Ergebnisse unter Kapitel 6.4 dazu zeigen, werden durch das Zusammenschalten eine grössere Zahl mögliche Abnehmer von Bremsenergie erreicht (Fahrzeuge, Weichenheizungen), wodurch insgesamt das Potential von ungenutzter Bremsenergie merklich reduziert werden kann. Dadurch verringert sich natürlich auch entsprechend das Sparpotential für potentielle Wechselrichter oder Energiespeicher.

Basierend auf dem BVB-Schaltschema [4] sowie auf den Ergebnissen aus der ersten Simulationsrunde wurden deshalb in einem nächsten Schritt, als erste Annahme und mit dem Ziel möglichst viel ungenutzte Bremsenergie im ganzen Netz zu nutzen, fünf Speisegebiete mittels neuen Schaltungen vergrössert (siehe Beschreibung der simulierten erweiterten Speisegebiete unter Kapitel 5.3). Anschliessend wurden zudem die nachfolgend aufgeführten Standorte für einen Einsatz von Wechselrichter- oder Energiespeicher-Anlagen definiert.

- Voltastrasse
- Morgarten
- Dreispitz
- St. Alban (deckt bereits einen wesentlichen Bereich von Birsbrücke ab)
- Riehen

Die Optimierung, d.h. eine fundierte Standortwahl mit neuer Sektorbildung und unter Berücksichtigung sämtlicher Rahmenbedingungen (vorhandener Platz, schutztechnische Betrachtung, Sanierungsplanung) ist nicht Bestandteil vorliegender Studie. Die oben aufgeführten Standorte sind nur als erste mögliche Varianten zu verstehen.

Anmerkung: der Einsatz von Wechselrichtern oder Energiespeichern an mehreren Standorten, welche teilweise elektrisch über die Fahrleitung verbunden sind, bringt aber auch technische Herausforderungen mit sich:

- Bei Wechselrichtern sind Kreisströme über das Mittelspannungsnetz von parallel betriebenen Wechselrichtern zu verhindern, was regelungstechnisch anspruchsvoll ist.
- Bei den Energiespeichern muss über die Regelung oder übergeordnete Steuerung verhindert werden, dass sich diese gegenseitig Energie über die Sammelschiene hin und her schieben.

6.4 Ergebnisse Energiesparmassnahmen – Schritt 2 (Speisegebiete)

6.4.1 Übersicht Resultate

Wie im Kapitel 5.3 zum Vorgehen beschrieben, wurden in einem zweiten Schritt die erweiterten Speisegebiete einerseits als Einzelmassnahmen rein über die neue Netzschaltung und andererseits kombiniert mit einer Wechselrichter-Anlage simulatorisch untersucht. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 6-7 dargestellt. Für die Speisegebiete 4 und 5 sind gegenüber dem heutigen Netzzustand keine Änderungen des Schaltzustands nötig, weshalb für diese Speisegebiete in der Tabelle 6-7 für die Spalte „ohne WR“ die Werte für die Grundvariante gelten.

Zusätzlich wurde, basierend auf den durchgeführten Simulationen, eine mögliche Zukunftslösung, formuliert und mittels einer Simulationsvariante betrachtet, welche mehrere Massnahmen kombiniert umgesetzt:

- Erweiterte Speisegebiete 1-3 (Anpassung der Netzschaltung gemäss Kapitel 5.3),
- Je ein Wechselrichter an den Standorten St. Alban und Riehen sowie
- die Massnahme „Erhöhung der Rekuperationsenergie“.

Die jeweils pro Speisegebiet eingesparte Energie bezieht sich auf den Jahresenergieverbrauch aus der Grundvariante 2.

Massnahme	Grundvariante 2	Speisegebiet 1 mit /ohne WR Voltastrasse	Speisegebiet 2 mit /ohne WR Morgarten	Speisegebiet 3 mit /ohne WR Dreispitz	Speisegebiet 4 mit WR St. Alban-Anlage	Speisegebiet 5 mit WR Riehen	Mögliche Gesamtlösung (inkl. Erhöhung. Rekup.- Spannung)
Referenzvariante als Vergleich	-	2	2	2	2	2	2
Weichenheizung konstant / Bedarf gesteuert	b	b	b	b	b	b	b
Szenario mit Wechselrichter?	nein	nein	ja	nein	ja	nein	ja
Jahresenergieverbrauch [MWh]	37'409	36'754	36'649	36'754	36'631	36'935	36'804
Einsparung zur Grundvariante in [MWh]	-	655	760	655	778	474	604
<i>Einsparung zur Grundvariante in [%]</i>	-	1.8%	2.0%	1.8%	2.1%	1.3%	1.6%
Jährlich ungenutzte Bremsenergie [MWh]	3'780	3'126	3'029	3'107	2'983	3'308	3'179
Jährlich genutzte Bremsenergie [MWh]	11'496	12'147	12'244	12'167	12'291	11'965	12'094
Jährlich verfügbare Bremsenergie [MWh]	15'276	15'273	15'273	15'274	15'274	15'273	15'273
Anteil genutzter Bremsenergie in [%]	75%	80%	80%	80%	80%	78%	79%
Reduktion ungenutzte Bremsenergie zur Grundvariante [%]	-	17%	20%	18%	21%	12%	16%

Tabelle 6-7: Resultattabelle mit jährlichem Energieverbrauch und genutzter / ungenutzter Bremsenergie pro Szenario

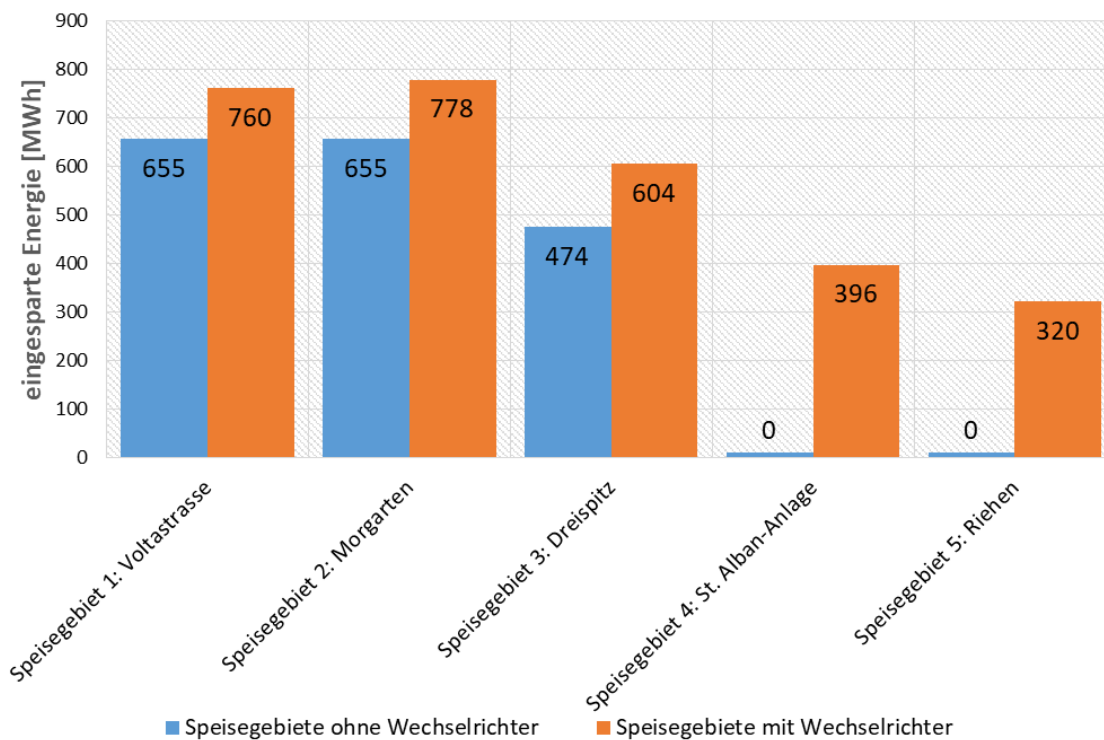


Abbildung 6-7: Grafik zur jährlich eingesparten Energie im MWh pro Variante, jeweils ohne und mit Wechselrichter (Speisegebiete 4 und 5 entsprechen der heutigen Netzkonfiguration, daher 0 kWh)

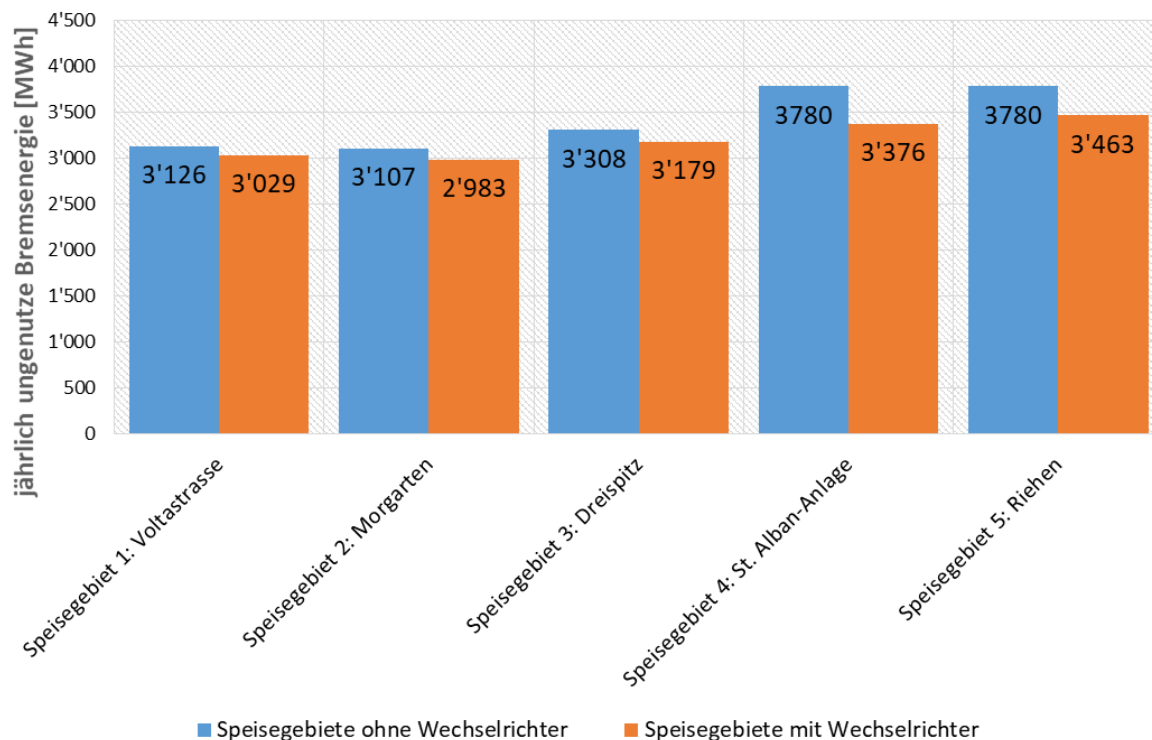


Abbildung 6-8: Grafik zur jährlich ungenutzten Bremsenergie in MWh pro Variante, jeweils ohne und mit Wechselrichter

Nachfolgende Grafik zeigt die im BVB-Netz anfallende rheostatische Bremsenergie mit der Variante 800FH, als eine mögliche Endvariante (Massnahmepaket). Je grösser die blauen Kreise, desto grösser der Anteil an verheizter Bremsenergie. Im Vergleich zur Abbildung 5-1 zeigt dies, dass mit dieser Variante ein Grossteil der rheostatischen Bremsenergie reduziert im „Kernnetz der BVB“ werden kann. Es verbleibt noch Potential an den folgenden Stellen:

- Ast Richtung St. Louis: Da an der Grenze zu Frankreich eine elektrische Trennung erfolgt, kann die dort auftretende Bremsenergie nicht besser genutzt werden
- Ast Richtung Weil am Rhein: Da an der Grenze zu Deutschland eine elektrische Trennung erfolgt, kann die dort auftretende Bremsenergie nicht besser genutzt werden. Zudem liegt in diesem Bereich auch das Depot Wiesenplatz, welches zu mindestens in den Randzeiten mit den abgestellten Fahrzeugen als Verbraucher von ungenutzter Bremsenergie gilt (wurde in den Simulationen jedoch nicht berücksichtigt, Energiesparpotential aufgrund des Energiebedarfs im Depot daher wohl etwas geringer, als in vorliegender Studie ausgewiesen). Eine Verbindung des Speisesektors Richtung Stadt, d.h. mit GR Voltastrasse, scheint zudem vom Fahrleitungsschutz her nicht möglich. Es wäre mindestens ein zusätzlicher Abgang seitens GR Wiesenplatz nötig.
- Vom Schänzli Richtung Pratteln: Infrastruktur gehört zum BLT-Netz, weshalb dieser Abschnitt nicht im Fokus für Massnahmen steht.

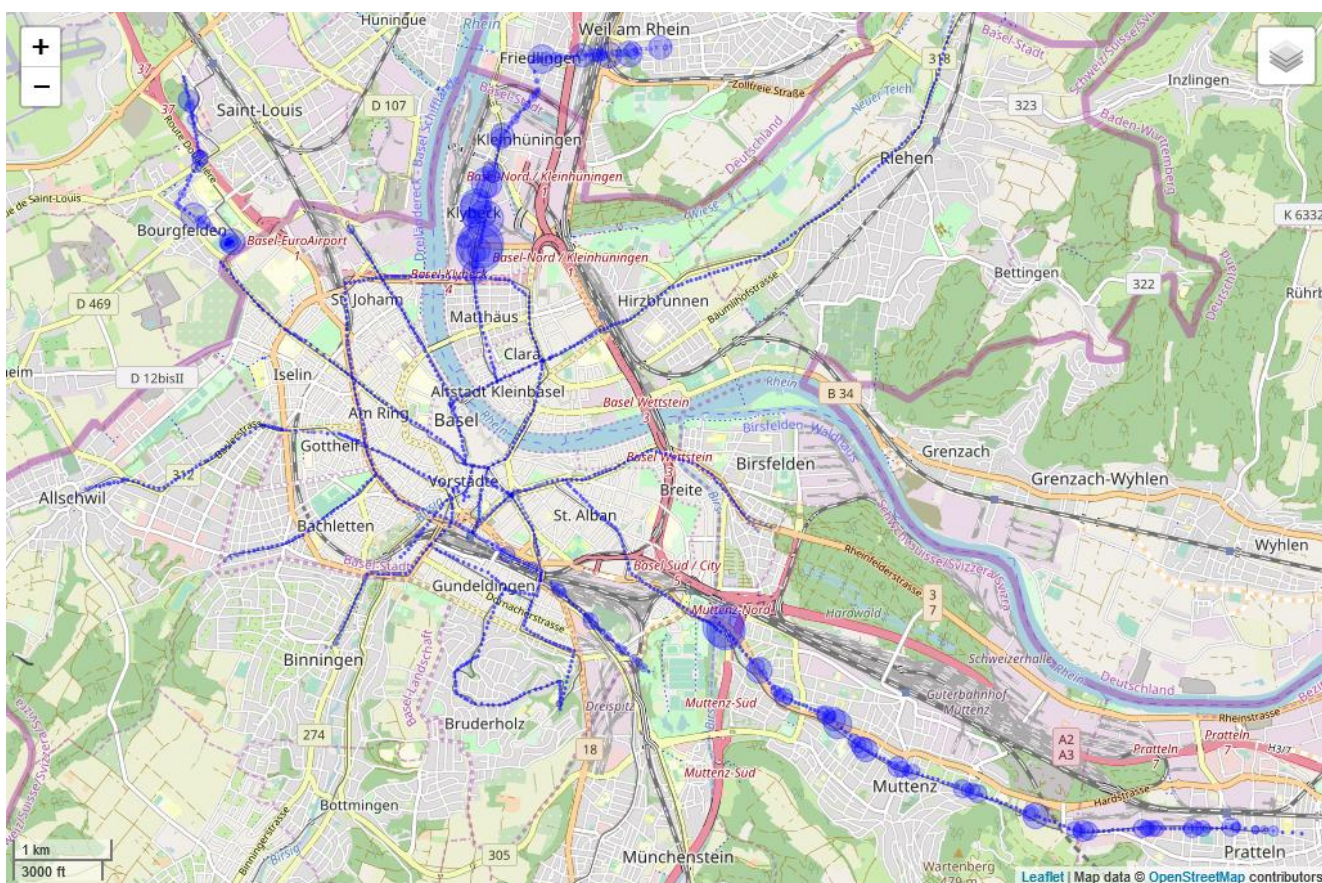


Abbildung 6-9: Grafik zur rheostatischen Bremsenergie im BVB-Netz basierend auf der Simulation 800FH (Gesamtlösung Frühling/Herbst) als eine mögliche Endvariante, Je grösser die Kreise, desto grösser die anfallende Bremsenergie

6.4.2 Interpretation und Bemerkungen

Die Ergebnisse in Tabelle 6-7 sowie die darauffolgenden Balkendiagramme zeigen das Energiesparpotential der erweiterten Speisegebiete einerseits ohne (für diejenigen mit Schalthandlungen gegenüber dem heutigen Netzzustand) und andererseits mit Einsatz von einem Wechselrichter pro Speisegebiet. Es fällt auf, dass bereits ohne Wechselrichter, also ausschliesslich durch das Zusammenschalten von Speiseabschnitten, eine beachtliche Menge an rheostatischer Bremsenergie reduziert und somit eingespart werden kann.

Bei den Speisegebieten 1 und 2 (Voltastrasse und Morgarten) beträgt das jährliche Energiesparpotential ohne Wechselrichter je 655 MWh. Die ungenutzte Bremsenergie kann um 17%, respektive 18% gegenüber der Grundvariante 2 reduziert werden. Mit der Option eines zusätzlichen Wechselrichters können im Speisegebiet 1 nochmals 105 MWh und im Speisegebiet 2 rund 123 MWh an Energie eingespart werden. Der Nutzen des Wechselrichters ist also vergleichsweise erheblich kleiner als der Nutzen der angenommenen Netzanpassung. Dies bestätigt auch der Vergleich mit dem Ergebnis aus der ersten Simulationsreihe, in welcher mit aktuellem Netzzustand ein Wechselrichter am Gleichrichterstandort Voltastrasse noch 358 MWh einsparen konnte. Durch den vergrösserten Speisebereich ist also weniger ungenutzte Bremsenergie auf dem Netz vorhanden, weshalb der Nutzen einer stationären Energiesparmassnahme erheblich abnimmt.

Im Speisegebiet 3 (Dreispietz) kann mit der gewählten neuen Sektorbildung jährlich 474 MWh an Gesamtenergie eingespart werden. Dies entspricht einer Senkung der total vorhandenen rheostatischen Bremsenergie von 12% gegenüber der Grundvariante 2. Mit einem zusätzlichen Wechselrichter am Gleichrichterstandort Dreispitz kann jährlich noch 130 MWh zusätzlich, also total 604 MWh, eingespart werden.

Die beiden Speisegebiete 4 und 5 (St. Alban und Riehen) sind aus Sicht Netzschtaltung heute bereits optimiert. Mit einem Wechselrichter am Gleichrichterstandort St. Alban Anlage kann der jährliche Energieverbrauch um 396 MWh gesenkt werden. Dies entspricht einer Reduktion der rheostatischen Bremsenergie von 11 %. Beim Gleichrichterstandort Riehen liegt das Energiesparpotential mit 320 MWh etwas tiefer.

Bei der kombinierten Simulationsvariante (letzte Spalte in Tabelle 6-7), wurden die Speisegebiete 1-3 sowie zwei Wechselrichter in den bereits heute bestehenden Speisegebiete 4 und 5, sowie der Erhöhung der Rekuperationsspannung untersucht. Das jährliche Energiesparpotential beträgt insgesamt 2'126 MWh, was einer Reduktion der heute ungenutzten Bremsenergie von 3'780 MWh auf 1'573 MWh entspricht (das sind 58 %).

Spannend ist nun auch ein Vergleich mit dem Nutzen der anderen untersuchten Energiesparmassnahmen (Kapitel 6.3.1). Mit diesem letzten Szenario ist nun eine Massnahme-Variante vorhanden, welche in den Nutzbereich der Massnahme „mobiler Energiespeicher“ (Reduktion der Gesamtenergie von 2'875 MWh) kommt.

7 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG

Nachfolgende Berechnung der Rentabilität soll zeigen, ob sich mit den verwendeten Parametern die untersuchten Energiesparmassnahmen auch wirtschaftlich rechnen könnten. Aufgrund diverser Unbekannten wird mit einer Sensitivitätsanalyse (Kapitel 7.4) versucht, die Stabilität der Aussagen aufzuzeigen.

7.1 Parameter zur Berechnung der Rentabilität

Für die Berechnung der Rentabilität der untersuchten Energiesparmöglichkeiten wurden die Parameter gemäss der Zusammenfassung in Tabelle 7-1 verwendet.

7.1.1 Anschaffungs-, Installationskosten und Integrationskosten

Die Anschaffungs-, Installationskosten und Integrationskosten sowie die Wartungskosten sind grundsätzlich Annahmen.

7.1.1.1 Erhöhung der Bremsspannung auf den Fahrzeugen

Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die Machbarkeit, insbesondere hinsichtlich der historischen Fahrzeuge, gegeben ist. Allfällige Kosten für eine Umrüstung / Anpassung sind im Rahmen der vorliegenden Studie nicht abschätzbar. Zudem ist davon auszugehen, dass seitens BLT keine Anpassungen an den Fahrzeugen notwendig sind.

Für die Realisierung muss auf jedem Fahrzeug die Kennlinie in der Fahrzeugsteuerung angepasst werden. Pro Fahrzeug sollte dies relativ schnell realisierbar sein. Ausgehend von im Mittel 4 h pro Fahrzeug ergibt dies bei 89 Fahrzeugen (Angaben BVB) einen Aufwand von rund 356 h. Bei einem Stundensatz von 180 CHF/h resultieren gerundet 65'000 CHF. Zusätzlich werden als Grundkosten für Engineering, Abklärungen, Administration und Unvorhergesehenes 35'000 CHF hinzugerechnet. Dies ergibt einen geschätzten totalen Aufwand von 100'000 CHF.

7.1.1.2 Erhöhung der Nennspannung auf 750V

Die Erhöhung der Nennspannung bedingt eine Anpassung des Transformators im Gleichrichterunterwerk, damit der Spannungsbereich überhaupt erzeugt werden kann. Es darf davon ausgegangen werden, dass die übrigen Komponenten der Energieversorgung keine Anpassung benötigen (Isolation sollte auch für 750 V ausgelegt sein). Weiter darf auch davon ausgegangen werden, dass die modernen Fahrzeuge standardmässig für 750 V ausgelegt sind und diese Spannung grundsätzlich beherrschen. Es bedarf lediglich eine Anpassung der Kennlinien des Traktionsumrichters und der Fahrzeugsteuerung.

Ein Wechsel der Spannung erfolgt netzweit an einem Tag (über Nacht). Hierfür müssen die Transformatoren umschaltbar auf 750 V sein. Dies bedingt eine Umrüstung sämtlicher Transformatoren. Eine Variante ist, bei der Sanierung eines bestehenden Unterwerks die Transformatoren standardmässig umschaltbar auszurüsten. Dadurch, dass einige Unterwerke neu sind

und ihre Lebensdauer daher erst in 30 Jahren erreichen, dauert diese Umsetzung aber relativ lange. Die Mehrkosten zu einem herkömmlichen Transformator werden mit 30'000 CHF beziffert. Bei 25 Unterwerken ergibt dies Mehrkosten von 750'000 CHF. Zusätzlich sind noch Aufwände für Engineering und Administration von 75'000 CHF (10%) einzurechnen sowie der Aufwand für die fahrzeugseitige Anpassung, welche im ähnlichen Rahmen sein sollte, wie bei der Anpassung der Bremsspannung in Kapitel 7.1.1.1, also rund 80'000 CHF. Dies ergibt Kosten im Bereich von gerundet 900'000 CHF.

Die Kosten einer Umrüstung der bestehenden Transformatoren auf 750 V (umschaltbar), eine alternative Möglichkeit, wird mit 40'000 CHF etwas höher geschätzt. Bei 25 Unterwerken resultieren somit Kosten im Bereich von total rund 1'200'000 CHF, inkl. Engineering, Administration und Anpassung Fahrzeugkennlinie. Es darf davon ausgegangen werden, dass eine Umsetzung dieser Variante innerhalb relativ kurzer Zeit realisierbar ist. Für die Wirtschaftlichkeitsrechnung wird daher von dieser Variante mit den leicht höheren Kosten ausgegangen.

7.1.1.3 Mobile Energiespeicher

Bei der Variante mit den mobilen Energiespeichern wurde davon ausgegangen, dass die gesamte BVB-Fahrzeugflotte, ausser die älteren Cornichon-Trams, mit Batteriespeichern ausgerüstet wird. Gemäss Angaben von BVB wurde zudem von 89 Trams ausgegangen.

Basierend auf Annahmen und unbestätigten Angaben von Herstellern wird davon ausgegangen, dass ein Nachrüsten mit einem Speicher pro Fahrzeug rund 150'000 CHF kostet. Hinzu werden Kosten für Engineering und Administration von pauschal 1'250'000 angenommen, was totale Kosten von rund 14'600'000 CHF ergibt.

Basierend auf einer nach der Umrüstung zu erwartenden restlichen Lebensdauer der Fahrzeuge von 20 Jahren, ist davon auszugehen, dass die Speicher nach der halben Lebensdauer ersetzt werden müssen. Der Ersatz wird mit 20'000 CHF pro Fahrzeug beziffert, was bei 89 Fahrzeugen und 20 Jahren Amortisation jährliche Kosten von 89'000 CHF ergibt.

7.1.1.4 Fahrleitungsverstärkung mit 120mm² Feeder

Die Gesamtkosten für den Ersatz des heute montierten 107 mm² Feeders basieren auf Angaben aus einer früheren BVB-Studie bezüglich Speisekonzept auf dem Ast Richtung Allschwil [2]. Dabei wurden die Material- und Montagekosten für einen neuen Feeder auf rund 50 kCHF/km geschätzt. Bei einer totalen Streckendistanz von 73 km (Angaben gemäss BVB Homepage) und 2 Seilen ergibt dies 7.3 Mio. CHF Initialkosten.

7.1.1.5 Stationäre Energiespeicher

Die Kosten für die Variante Energiespeicher basieren auf Erfahrungswerten aus anderen Projekten. Die Kosten für den Energiespeicher für eine nutzbare Kapazität und Leistung, wie sie den Simulationen zu Grunde gelegt wurde, wird auf 200'000 CHF beziffert. Hinzu werden 50'000 für Anpassungen an der Bestandesanlage und 30'000 CHF für Engineering und Administration eingerechnet, was total 280'000 CHF ergibt.

Für den stationären Energiespeicher wird von einer Lebensdauer von 20 Jahren ausgegangen. Bei einem Speicher mit Batterien / Supercaps sind diese nach ca. 10 Jahren auszuwechseln. Die Kosten hierfür werden mit 40'000 geschätzt, was bei 20 Jahren pro Jahr einen Aufwand von 2'000 CHF ergibt. Hinzu werden zusätzliche jährliche Wartungskosten von 1'000 CHF eingerechnet.

7.1.1.6 Wechselrichter

Hier sind 2 Varianten denkbar:

- Aufrüsten einer bestehenden Gleichrichterstation
- Aufrüsten einer neu zu bauenden oder zu sanierenden Gleichrichterstation

Zur Anwendung wird wohl der erste Fall kommen. Dieser wird wohl auch teurer sein.

Basierend auf Erfahrungswerten (über SIMAP publizierte Ausschreibung der Appenzeller Bahnen für den Wechselrichter Bavaria) werden die Kosten auf 320'000 CHF angenommen. Hinzu kommen Anpassungen am bestehenden Transformator und der Bestandesanlage, welche mit 80'000 angenommen werden. Zudem werden 30'000 CHF für Engineering und Administration eingerechnet. Die Gesamtkosten werden daher auf 430'000 CHF beziffert.

Zusätzlich werden jährliche Wartungskosten von 1'000 CHF eingerechnet.

7.1.2 Energiepreis

Bei BVB deckt der massgebende Energiepreis, nebst der eigentlichen Energie und die Netznutzung, ebenfalls die Investitionen von IWB für die Gleichrichterstationen ab - die Gleichrichterstationen sind im Besitz von IWB und werden auch von IWB gewartet. Aus diesem Grund ist der Energiepreis im Vergleich zu anderen Verkehrsbetrieben deutlich höher.

Pro kWh Energie zahlt BVB gemäss eigenen Angaben zwischen 18 Rappen und 22 Rappen an den Energielieferanten IWB. Für die Bestimmung der jährlichen Einsparung wurde vom „pessimistischeren“ Wert von 18 Rp. ausgegangen.

Mit der Umsetzung einer Wechselrichter-Variante müsste der massgebende Energiepreis zwischen BVB und IWB neu verhandelt werden. Denn beim Zurückspeisen von Energie wird nur der reine Energiepreis an BVB vergütet (Anteil Netznutzung und Investitionsbeitrag). Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der untersuchten Szenarien wurde der Energiepreis deshalb basierend auf Erfahrungswerten zu aktuellen Energiepreisen anderer Verkehrsbetriebe gewählt und wurde auf 0.05 CHF/kWh beziffert.

Die Energiepreise sind aktuell relativ tief. Es wurde, als pessimistische Annahme, von konstanten Energiepreisen über die nächsten Jahre ausgegangen (0 % jährlicher Anstieg des Energiepreises).

7.1.3 Abzinsung / Diskontierung

Der Wert für die Diskontierung (Abzinsung) basiert auf dem Teuerungsverlauf der letzten Jahre in der Schweiz (siehe [13]). Er wird mit 1 % beziffert.

7.1.4 Abschreibung

Für die Abschreibung der Kosten für die Erhöhung der Bremsspannung auf den Fahrzeugen werden 20 Jahren angenommen. Dies mit der Annahme, dass die umgerüsteten Fahrzeuge noch eine mittlere Lebensdauer von 20 Jahren aufweisen.

Für die Abschreibung der Kosten für die Erhöhung der Nennspannung werden 12.5 Jahren angenommen. Dies mit der Annahme, dass die umzurüstenden Gleichrichteranlagen im Mittel 50 % ihrer Abschreibungsdauer von 25 Jahren (siehe nächste Absatz) erreicht haben.

Die Abschreibungsdauer für Fahrleitungsanlagen und Unterwerke wurde der „Verordnung des UVEK über das Rechnungswesen der konzessionierten Unternehmen“ [12] entnommen und entspricht der kürzesten zulässigen Dauer gemäss dieser Verordnung. Diese beträgt 25 Jahre.

Energiespeicher sind in der Verordnung des UVEK [12] nicht explizit erwähnt. Für die vorliegende Studie wurde von 20 Jahren ausgegangen.

Wie in 7.1.1.3 bereits erwähnt, wird für die auf Fahrzeug eingesetzten Speicher von einer Abschreibungsdauer von 20 Jahren ausgegangen. Auch hier unter der Annahme, dass die umgerüsteten Fahrzeuge noch 20 Jahre in Betrieb sein werden.

7.2 Zusammenfassung und Rentabilität der Massnahmen (Schritt 1)

Die jährlichen Einsparungen in [MWh] in nachfolgender Tabelle entsprechen den Ergebnissen der Simulationen zu den Massnahmen gemäss Kapitel 6.3. Es wurde in einem ersten Schritt sowohl für die Wechselrichter- als auch für die Energiespeichervariante der Gleichrichterstandort Voltastrasse gewählt. Die jährlichen Ersparnisse in [1000 CHF/Jahr] ergeben sich aus dem Produkt vom Energiepreis, abzüglich den Wartungskosten und eingesparter Energie.

Basierend auf den oben beschriebenen Parametern wurde pro Massnahme die resultierende Amortisationszeit berechnet. Wie die Ergebnisse in der nachfolgenden Tabelle zeigen, sind mit den unter Kapitel 7.1 definierten Parameterwerten die Varianten „Erhöhung der Bremsspannung“, „Erhöhung der Nennspannung“ sowie „Energiespeicher Voltastrasse“, sofern realisierbar, rentabel.

Parameter	Erhöhung der Bremsspannung	Erhöhung der Nennspannung	mobile Energiespeicher	120mm ² Feeder	Energiespeicher Voltastrasse	Wechselrichter Voltastrasse
Anschaffungs-, Installations- und Integrationskosten [1000 CHF]	100	1200	14600	7300	280	430
Wartungskosten [1000 CHF/Jahr]	0	0	89	0	3	1
Jährliche Energieersparnis (Simulationsergebnisse) [MWh]	205	649	2875	130	257	358
Massgebender Energiepreis [CHF/kWh]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.05
Jährliche Ersparnisse (nicht diskontiert) [1000 CHF/Jahr]	37	117	432	23	43	17
Anstieg Energiepreis [%/Jahr]	0	0	0	0	0	0
Diskontierung [%]	1	1	1	1	1	1
Abschreibungsdauer / Nutzung [Jahre]	20	12.5	20	25	20	25
Amortisationszeit [Jahre]	3	11	41	> 50	7	29

Tabelle 7-1: Amortisationszeit basierend auf den verwendeten Parametern im Vergleich zur Abschreibungsdauer in Jahren. (Die Amortisationsdauer ist rot markiert, sofern diese grösser als die Abschreibungs-/ Nutzungsdauer ist)

7.3 Zusammenfassung und Rentabilität der Massnahmen erweiterte Speisegebiete (Schritt 2)

Für die untersuchten Massnahmen mit reinen Schalthandlungen (bilden von erweiterten Speisegebieten) werden nachfolgend keine Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen angestellt, da der hohe Nutzen im Vergleich zu den sehr geringen Kosten eindeutig scheint und daher für einen Entscheid keine solchen Berechnungen benötigt werden.

Für die Speisegebiete 1 – 3 wurde in nachfolgender Betrachtung als jährliche Energieersparnis das Delta aus der in der Ergebnistabelle im Kapitel 6.4.1 dargestellten Einsparung zur Grundvariante verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass alleine durch die Netzschalt-Anpassung (Erweiterung des Speisebereichs) ein grosser Anteil an Gesamtenergie jährlich eingespart werden kann. Mit einer stationären Energiesparmassnahme kann hier nur noch ein vergleichbar kleiner zusätzlicher Anteil an Energieverbrauch reduziert werden.

Parameter	Speisegebiet 1 mit WR Voltastrasse	Speisegebiet 2 mit WR Morgarten	Speisegebiet 3 mit WR Dreispitz	Speisegebiet 4 mit WR St. Alban-Anlage	Speisegebiet 5 mit WR Riehen	Gesamtlösung WR + Erh. Rekup.-Spg.
Anschaffungs-, Installations- und Integrationskosten Wechselrichter [1000 CHF]	430	430	430	430	430	960
Wartungskosten [1000 CHF/Jahr]	1	1	1	1	1	2
Jährliche Energieersparnis (Simulationsresultate) [MWh]	105	123	130	396	320	2126
Massgebender Energiepreis [CHF/kWh]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05 / 0.18
Jährliche Ersparnisse (nicht diskontiert) [1000 CHF/Jahr]	4	5	6	19	15	283
Anstieg Energiepreis [%/Jahr]	0	0	0	0	0	0
Diskontierung [%]	1	1	1	1	1	1
Abschreibungsdauer / Nutzung [Jahre]	25	25	25	25	25	25
Amortisationszeit [Jahre]	> 50	> 50	> 50	26	33	3

Tabelle 7-2: Amortisationszeit der Varianten erweiterte Speisegebiete mit **Wechselrichtern** basierend auf den verwendeten Parametern im Vergleich zur Abschreibungsdauer in Jahren. (Die Amortisationsdauer ist **rot** markiert, sofern diese grösser als die Abschreibungs-/Nutzungsdauer ist)

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Tabelle 7-2 zeigt, dass für die drei Wechselrichteranlagen an den Standorten Voltastrasse, Morgarten und Dreispitz eine Amortisationsdauer von > 50 Jahren resultiert. Die Massnahme Wechselrichter ist also in Kombination mit dem empfohlenen Zusammenschalten von Speiseabschnitten eindeutig nicht rentabel.

Bei den Speisegebieten 4 und 5 ist die aktuelle Situation hinsichtlich Netzschaltung bereits optimiert, weshalb da keine Änderungen berücksichtigt wurden. Die Szenarien Speisegebiete 4 und 5, welche je

mit einem Wechselrichter simuliert wurden, zeigen, dass auch diese beiden Investitionen mit den angenommenen Parametern wirtschaftlich wohl nicht oder nur knapp rentabel sind.

Die gemischte Simulationsvariante mit den Speisegebieten 1-3, den zwei Wechselrichtern St. Alban und Riehen und der Massnahme Erhöhung der Rekuperationsspannung weist mit einer Amortisationsdauer von nur 3 Jahren ein sehr vielversprechendes Potential aus. Basierend auf den Berechnungen kann jährlich rund 2'126 MWh an Gesamtenergie eingespart werden, wobei die beiden Wechselrichter St. Alban und Riehen gemeinsam einen Anteil von 752 MWh übernehmen.

Wie in Kapitel 5.2 erwähnt, kann der Wechselrichter grundsätzlich als Energiespeicher mit unendlichem Füllstand angesehen werden. Das heisst, mit den Wechselrichter-Ergebnissen kann, auch wenn nur grob, der Nutzen von einer Energiespeicher-Lösung abgeleitet werden. Dazu dienen die Ergebnisse aus den Simulationen Energiespeicher Voltastrasse und Wechselrichter Voltastrasse in Kapitel 6.3.1: Demnach liegt das jährliche Energiesparpotential beim Wechselrichter bei 358 MWh. Im Vergleich dazu, kann mit einem Energiespeicher (mit den entsprechend angenommenen Parameterwerten) 257 MWh, also ein Anteil von rund 70 % genutzt werden. Mit einem optimierten Energiespeicher (Energieinhalt, Leistung und Regelkennlinie) könnte der Nutzen sicherlich noch etwas erhöht werden. Für den nachfolgenden Vergleich wird aber ein Energiespar-Nutzen von 70 % des Wechselrichters verwendet.

Parameter	Speisegebiet 1 mit ES Voltastrasse	Speisegebiet 2 mit ES Morgarten	Speisegebiet 3 mit ES Dreispitz	Speisegebiet 4 mit ES St. Alban-Anlage	Speisegebiet 5 mit ES Riehen	Gesamtlösung ES + Erh. Rekup.-Spg.
Anschaffungs-, Installations- und Integrationskosten Energiespeicher [1000 CHF]	280	280	280	280	280	660
Wartungskosten [1000 CHF/Jahr]	3	3	3	3	3	6
Jährliche Energieersparnis (Simulationsergebnisse) [MWh]	73	86	91	277	224	1901
Massgebender Energiepreis [CHF/kWh]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
Jährliche Ersparnisse (nicht diskontiert) [1000 CHF/Jahr]	10	12	13	47	37	336
Anstieg Energiepreis [%/Jahr]	0	0	0	0	0	0
Diskontierung [%]	1	1	1	1	1	1
Abschreibungsdauer / Nutzung [Jahre]	20	20	20	20	20	20
Amortisationszeit [Jahre]	32	25	23	6	8	2

Tabelle 7-3: Amortisationszeit der Varianten erweiterte Speisegebiete mit **Energiespeichern** basierend auf den verwendeten Parametern im Vergleich zur Abschreibungsdauer in Jahren. (Die Amortisationsdauer ist rot markiert, sofern diese grösser als die Abschreibungs-/Nutzungsdauer ist)

Da die monetäre Ersparnis pro kWh beim Wechselrichter wesentlich kleiner ist als beim Energiespeicher (5 Rp./kWh im Vergleich zu 18 Rp./kWh, siehe Kapitel 7.1.2), weist eine Energiespeicher-Lösung aus wirtschaftlicher Sicht im BVB-Netz ein viel grösseres Potential auf. Dies wird in den oben gezeigten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen deutlich.

Alle drei Varianten zu den Teilnetzen 1-3 scheinen auch mit der Energiespeichervariante basierend auf der obigen Wirtschaftlichkeitsrechnung nicht rentabel. Hingegen resultiert bei den beiden anderen Speisegebieten 4 und 5 mit einer jährlichen Energieeinsparung von 277 MWh und 224 MWh, im Vergleich zum Wechselrichter, ein wirtschaftliches Ergebnis.

Bei der Gesamtvariante resultiert mit einer jährlichen Energieersparnis von ca. 1900 MWh eine Amortisationszeit von nur 2 Jahren.

7.4 Sensitivitätsanalyse

Um den Einfluss der einzelnen Parameter aus Tabelle 7-1 auf die Rentabilitätsrechnung zu erkennen, wurde eine univariate Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Univariat bedeutet dabei, dass nur ein Parameter verändert wird und alle anderen weiterhin den Ausgangswert gemäss Tabelle 7-1 aufweisen.

Der zu variierende Parameter wurde dabei so verändert, bis die Initialkosten den diskontierten Ersparnissen genau nach der Lebensdauer/Amortisationszeit entsprechen, d.h. es wurde für den variierten Parameter der Grenzwert zwischen wirtschaftlich rentabel und unrentabel bestimmt. Tabelle 7-4 zeigt, diese Grenzwerte zusammen mit der prozentualen Abweichung zum angenommenen Wert aus Tabelle 7-1. Mit Kleiner- resp. Grösser-Zeichen ist der rentable Parameterbereich angegeben. Da die beiden Massnahmen unter den Basisannahmen wirtschaftlich rentabel sind, zeigt Tabelle 7-4 wie stark sich ein Parameter auf die ungünstige Seite verändern kann, bis die Wirtschaftlichkeit nicht mehr gegeben ist.

Bei den Varianten Mobile Energiespeicher, 120 mm² Feeder sowie Wechselrichter ist nun ersichtlich, wie hoch die Initialkosten maximal sein dürfen, damit die Massnahme unter Berücksichtigung der andern angenommenen Parameterwerten rentabel wird. Eine Anpassung der Fahrzeugkennlinien zur Optimierung des Rekuperationsverhalten darf somit beispielsweise maximal 672'000 CHF kosten, damit die Investition mit den angenommenen Parametern, insbesondere der vorgegebenen Nutzungsdauer, rentabel ist. Bei der Erhöhung der Nennspannung betragen diese maximalen Initialkosten beispielsweise 1.380 Mio. CHF.

Parameter	Erhöhung der Bremsspannung		Erhöhung der Nennspannung		mobile Energiespeicher		120mm ² Feeder		ES Voltastrasse		WR Voltastrasse	
Anschaffungs-, Installations- und Integrationskosten [1000 CHF]	100	< 672	1200	< 1380	14600	< 7809	7300	< 520	280	< 788	430	< 376
Jährliche Energieersparnis [MWh]	205	> 30	649	> 564	2875	> 4945	130	> 1823	257	> 102	358	> 407
Energiepreis [CHF/kWh]	0.18	> 0.03	0.18	> 0.16	0.18	> 0.31	0.18	> 2.53	0.18	> 0.07	0.05	> 0.06
Anstieg Energiepreis [%/Jahr]	0	> -36.3	0	> -2.5	0	> 5.8	0	> 18.6	0	> -14.0	0	> 1.2
Diskontierung [%]	1	< 58.4	1	< 3.6	1	< -4.6	1	< -14.8	1	< 17.4	1	< -0.2

Tabelle 7-4: Univariate Sensibilitätsprüfung für die einzelnen Parameter der Rentabilitätsberechnung (nur für die erste Simulationsreihe - „Schritt 1“)

8 FAZIT, DISKUSSION, WEITERES VORGEHEN

8.1 Zusammenfassung

Als Wiederholung die in der Aufgabenstellung durch BVB gestellten Fragen:

- 1) Ist mit der heutigen auf dem BVB-Netz verkehrenden Flotte und mit dem heute vorhandenen Traktionsstromnetz eine komplette Nutzung der rekuperierten Energie möglich?
- 2) Sind lokale Unterschiede zwischen Innenstadtbereiche und einzelnen Stichstrecken in den Aussenbezirken festzustellen?
- 3) Aufzeigen des Nutzens möglicher Massnahmen hinsichtlich der Fragen 1) und 2):
 - a) Spannungserhöhung von Nennspannung 600 V auf 750 V
 - b) Erhöhung der Rückspeisespannung von $U_{\max 1} = 720 \text{ V}$ auf $U_{\max 2} = 800 \text{ V}$ gemäss EN 50163 [11] (unter Berücksichtigung der zeitlichen Limitierung auf 5 Minuten).
 - c) Energiespeicher auf den Fahrzeugen
 - d) Stationäre Energiespeicher
 - e) Querschnittserhöhung der Verstärkungsleitung auf $2 \times 120 \text{ mm}^2$
 - f) Rückspeisefähige Gleichrichter (Wechselrichter)
- 4) Welche Reserven betreffend Anzahl rekuperierenden Fahrzeugen ergeben sich für die Fragen 1) - 3) und die allgemeine Energieversorgung, wenn angenommen wird, dass zusätzliche Beschaffungen von Fahrzeugen gleicher Bauart erfolgen?
- 5) Massnahmen wo möglich wirtschaftlich bewerten (Investitions- und Betriebskosten).

Die Resultate der Simulationen zeigen, dass eine komplette Nutzung der rekuperierten Bremsenergie im BVB-Netz grundsätzlich möglich wäre. Allerdings sind die dazugehörigen Kosten unverhältnismässig hoch. Beispielsweise kann mit mobilen Batteriespeichern fast die gesamte durch die BVB-Fahrzeuge anfallende Bremsenergie genutzt werden. Die dazugehörigen Investitionskosten für eine komplette Ausrüstung der Fahrzeuge sind aber so hoch, dass die Amortisationszeit auf weit über 50 Jahre zu liegen kommt.

Mit der Installation von Wechselrichtern oder stationären Energiespeichern ist eine möglichst komplette Nutzung der ungenutzten Bremsenergie nur über eine flächendeckende Installation von Anlagen möglich. Mit der betrachteten Variante am Standort Voltastrasse und dem heutigen Schaltzustand des Netzes können nur ca. 10 % der ungenutzten Bremsenergie genutzt werden. Wie die wirtschaftlichen Betrachtungen weiter zeigen, ist der Einsatz von Energiespeichern, insbesondere aufgrund der relativ hohen Energiepreisen, rentabel.

Eine noch wirtschaftlichere Möglichkeit um rheostatische Bremsenergie im Netz zu senken, ist das Bilden von erweiterten Speisegebieten. Die Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass der Nutzen einer solchen Massnahme beispielsweise im Speisegebiet 1 im Vergleich zur reinen Wechselrichtervariante deutlich höher ist (Faktor 2). Dank den praktisch vernachlässigbaren Kosten für eine solche Anpassung der Netzschtaltung entfällt auch die Frage nach der Rentabilität.

Basierend auf den Ergebnissen aller in vorliegender Studie untersuchten Varianten wird eine Kombination von Massnahmen empfohlen. Mit der untersuchten Gesamtvariante wurde beispielhaft

bereits ein mögliches Massnahmepaket betrachtet. Dieses enthält drei Netzanpassungen (Speisegebiete 1-3), zwei Wechselrichter (auch stationäre Energiespeicher möglich) und die Erhöhung der Rekuperationsspannung. Mit dieser Variante kann die rheostatische Bremsenergie im Netz um 58% gesenkt werden. Allerdings ist, basierend auf den Ergebnissen aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, der Einsatz von stationären Energiespeichern wirtschaftlicher als mit Wechselrichtern.

In der nachfolgenden Tabelle werden der Nutzen zur Reduktion der ungenutzten Bremsenergie sowie die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der betrachteten Massnahmen zusammengefasst. Eine Erläuterung pro Massnahme erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

Massnahme	Beurteilung Nutzen zur Reduktion der ungenutzten Bremsenergie	Beurteilung Wirtschaftlichkeit	Schlussfolgerung
Erhöhung der Bremsspannung	Gering (< 10 %)	rentabel	Technische Machbarkeit (Oldtimer) nicht sicher. Prüfung der Umsetzbarkeit empfohlen
Erhöhung der Systemspannung auf 750 V	Gering (< 10 %)	nicht rentabel	Falls nicht andere Gründe für eine Erhöhung bestehen, ist diese Variante nicht weiterzuverfolgen
mobile Energiespeicher	Hoch (> 80 %)	nicht rentabel	Kosten zum Nutzen scheinen unverhältnismässig hoch. Empfohlen, diese Variante nicht weiterzuverfolgen. Bei Beschaffung von Neufahrzeugen ist dies jedoch zu prüfen.
Fahrleitungsverstärkung mit 120mm ² Feeder	Gering (< 10 %)	nicht rentabel	Empfohlen, diese Variante nicht weiterzuverfolgen.
stationärer Energiespeicher	An einem Standort gering (< 10 %) An mehreren Standorten hoch (> 80 %)	rentabel	Scheint die vielversprechendste Variante. Empfohlen, die Umsetzung an mehreren Standorten weiterzuverfolgen.
rückspeisefähiger Gleichrichter	An einem Standort gering (< 10 %) An mehreren Standorten hoch (> 80 %)	knapp nicht rentabel	Rentabilität im Detail prüfen, da hohe Sensitivität zum Energiepreis besteht.
Zusammenschalten von Speisesektoren (Speisegebiete erweitern)	Hoch (> 80 %)	rentabel	Prüfung der Umsetzbarkeit empfohlen

Tabelle 8-1: Zusammenfassung Nutzen, Rentabilität und Fazit der untersuchten Massnahmen

8.2 Variante Erhöhung Rekuperationsspannung

Die Ergebnisse zeigen, dass mit der Anpassung der Rekuperationsspannung von heute 720 V auf 800 V jährlich rund 205 MWh an Gesamtenergie eingespart werden kann. Der Anteil an ungenutzter Bremsenergie kann jedoch nur marginal verkleinert werden.

Bei einem Energiepreis von 18 Rp./kWh entspricht diese eingesparte Energie einer jährlichen Einsparung von 37 kCHF. Die Rentabilitätsprüfung hat zudem ergeben, dass die angenommenen Investitionskosten von 100'000 CHF bereits nach 3 Jahren amortisiert sind. Gemäss der Sensitivitätsanalyse wäre die Massnahme auch dann rentabel, wenn die tatsächlichen Investitionskosten bis zu 6x höher ausfallen würden.

Eine zukünftige Anpassung der Fahrzeugkennlinien scheint demnach sinnvoll. Es stellt sich aber die Frage, ob mit der Erhöhung der Bremsspannung Schäden an alten Fahrzeugen (Oldtimer) auftreten können. Es wird empfohlen, die Umsetzbarkeit dieser Massnahme zu prüfen.

Anmerkung: Wie die Variante „mögliche Gesamtlösung“ zeigt, würde die Umsetzung dieser Massnahme auch den Einsatz von stationären Energiespeichern oder Wechselrichtern begünstigen (ungenutzte Bremsenergie könnte weiter transportiert werden).

8.3 Variante Erhöhung Systemspannung $U_{\text{Nenn}} = 750 \text{ V}$

Eine Erhöhung der Systemspannung auf 750 V scheint dank des hohen Energiepreises rentabel zu sein. Aus den Simulationen resultiert eine jährliche Energieersparnis von 649 MWh. Mit dem in der Rentabilitätsbetrachtung verwendeten Energiepreis von 18 Rp./kWh ergibt dies eine jährliche Einsparung von rund 117'000 CHF. Im Vergleich dazu stehen die Initialkosten, welche in vorliegender Betrachtung auf rund 1.2 Mio CHF geschätzt wurden. Die Amortisationsdauer beträgt 11 Jahre, wobei die Nutzungsdauer nur bei 12.5 Jahre liegt (siehe dazu Kapitel 7.1.4). Die Sensitivitätsanalyse in Tabelle 7-4 zeigt, dass wenn der Energiepreis um 2 Rappen, unter 16 Rp./kWh fällt, die Massnahme wirtschaftlich nicht mehr rentabel ist.

Es ist zudem zu bemerken, dass der Anteil der ungenutzten Bremsenergie nur unwesentlich reduziert werden kann. Falls daher nicht andere Gründe für eine Erhöhung der Systemspannung bestehen, wird empfohlen, diese Variante als Energiesparmassnahme nicht zwingend weiterzuverfolgen.

8.4 Variante mobiler Energiespeicher

Mit dem Einsatz von mobilen Energiespeichern kann praktisch die gesamte ungenutzte Bremsenergie wiederverwendet werden. Die jährliche Energieersparnis beläuft sich im untersuchten Szenario auf 2'875 MWh. Dies ergibt aus finanzieller Sicht eine Ersparnis von 432'000 CHF pro Jahr. Allerdings liegen die geschätzten Kosten für eine flächendeckende Ausrüstung der Fahrzeugflotte mit 14.6 Mio. CHF unverhältnismässig hoch. Die Amortisationszeit liegt mit dieser bei 41 Jahren.

Wie die Sensitivitätsanalyse zeigt, dürften die Initialkosten nur ca. 8 Mio. CHF sein, was bei einer Flotte von 89 Fahrzeugen eher nicht realistisch erscheint.

Bei der Beschaffung von neuem Rollmaterial sieht das natürlich anders aus. Der Mehrpreis könnte in diesem Bereich liegen. So würden aber nur ein Teil der Flotte vom Nutzen profitieren und ein namhafter Anteil ungenutzter Bremsenergie würde noch für längere Zeit bis zur Ablösung sämtlicher heute im Einsatz stehenden Fahrzeuge bestehen.

Es ist weiter aber anzumerken, dass ein Mix dieser Massnahmen beispielsweise mit einem stationären Energiespeicher nicht sinnvoll ist. Gezielt, falls der Einsatz von Fahrzeugen mit Energiespeichern nur auf bestimmten Linien erfolgen würde, wäre ein Mix aber denkbar.

8.5 Variante Fahrleitungsverstärkung mit 2x120mm² Feeder

Eine netzweite Erhöhung des Leiterquerschnitts der Verstärkungsleitung von 107 mm² Cu (Rillenfahrdraht) auf 120 mm² Cu (Seil) macht aus Sicht Energiesparen wenig Sinn. Die eingesparte Energiemenge beträgt gemäss Simulationsresultate gerade mal 130 MWh und fällt hauptsächlich durch tiefere Netzverluste an. Der Anteil ungenutzter Bremsenergie wird nur unwesentlich gesenkt. Die resultierenden Initialkosten für eine Anpassung im gesamten Netz belaufen sich auf 7.300 Mio CHF, weshalb die Amortisationszeit über 50 Jahren liegt.

Bei Neubauten oder Sanierungen ist der Einsatz eines 120 mm² Cu Seils aus Sicht Energiesparen aber sicher von Vorteil und macht bei den Kosten wohl keinen wesentlichen Unterschied (evtl. sogar günstiger). Mit dem grösseren Querschnitt resultieren aber auch bessere Fahrleitungsspannungen, was auch zu einem stabileren Betrieb führt. Dies wäre insbesondere für (N-1)-Situationen eine Verbesserung.

Ausschliesslich zum Energiesparen ist eine Anpassung des BVB-Standards der parallelen Verstärkungsleitung von 107 mm² auf 120 mm² aber nicht gerechtfertigt. Es müssten noch anderer Gründe vorliegen, wie tiefere Kosten oder einfachere Wartbarkeit, um einen Wechsel zu empfehlen.

8.6 Variante stationärer Energiespeicher

Die Ergebnisse zur Variante stationärer Energiespeicher am Gleichrichter-Standort Voltastrasse zeigen, dass eine Umsetzung der Massnahme wirtschaftlich rentabel ist. Der Einsatz des Energiespeichers, wie er in vorliegender Studie dimensioniert wurde (1 kWh nutzbare Kapazität und 450 kW Leistung), bewirkt eine Reduktion des Energiebedarfs um 257 MWh pro Jahr, was einer Einsparung von rund 43'000 CHF entspricht. Die berechnete Amortisationszeit beträgt 7 Jahre.

Wie die Sensitivitätsanalyse zeigt, wäre die Variante auch noch rentabel, wenn das jährliche Energiesparpotential nur rund 102 MWh beträgt anstelle der 257 MWh. Das Sparpotential dürfte also noch rund 60 % tiefer sein als hier berechnet.

Der Einsatz an nur einem Standort bewirkt über das ganze Netz gesehen jedoch nur eine beschränkte Reduzierung der ungenutzten Bremsenergie (-7 % beim GR Voltastrasse). Somit sind Energiespeicher an mehreren Stellen verteilt im Netz notwendig, um die rheostatische Bremsenergie effektiv nutzen zu können.

8.7 Variante Rückspeisefähiger Gleichrichter (Wechselrichter)

Die Rentabilitätsrechnung hat gezeigt, dass ein Einsatz von einem rückspeisefähigen Gleichrichter am bestehenden Gleichrichter-Standort Voltastrasse knapp nicht rentabel ist. Die Amortisationszeit beläuft sich auf 29 Jahren. Die berücksichtigte Nutzungsdauer liegt hingegen mit 25 Jahren nur knapp darunter. Der Unterschied zum Energiespeicher liegt an der unterschiedlichen monetären Einsparung pro kWh, welche beim Energiespeicher fast 4-Mal höher ist (siehe Kapitel 7.1.2).

Die Sensitivitätsanalyse hat aber auch gezeigt, dass bereits bei einer Erhöhung des vorliegend angenommenen Energiepreises von 5 Rp./KWh auf 6 Rp./KWh der Einsatz eines Wechselrichters rentabel wird. Wirtschaftlich interessant wird die Massnahme auch dann, wenn die tatsächlichen Investitionskosten um 13 % auf 376'000 CHF gesenkt werden könnten. Aber natürlich schneidet der Wechselrichter immer noch schlechter ab als der Energiespeicher.

Wie beim Energiespeicher bewirkt der Einsatz an nur einem Standort über das ganze Netz gesehen jedoch nur eine beschränkte Reduzierung der totalen ungenutzten Bremsenergie. Somit sind auch bei dieser Lösung für einen flächendeckenden Nutzen, Anlagen an diversen Stellen im Netz notwendig (siehe Kapitel 8.8).

8.8 Varianten erweiterte Speisegebiete

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass durch das Bilden von erweiterten Speisegebieten bereits ein erheblicher Anteil der vorhandenen rheostatischen Bremsenergie genutzt werden kann. Die Kosten für eine solche Anpassung der Netzschaltung sind dabei praktisch vernachlässigbar klein, weshalb sich eine bessere Vernetzung der Speisesektoren als erste Massnahme aufdrängt.

Die Sensitivitätsanalyse in Tabelle 7-4 hat aufgezeigt, dass die reine Wechselrichter-Variante Voltastrasse (ohne erweitertes Speisegebiet) mit einer resultierenden Amortisationszeit von 29 Jahren knapp nicht rentabel ist. Das jährliche Energiesparpotential müsste grösser als 407 MWh sein, damit eine Wechselrichter-Lösung wirtschaftlich ist. Mit dem Zusammenschalten nimmt das Energiesparpotential für die Wechselrichter-Lösungen aber ab. Die Ergebnisse der Szenarien zu den erweiterten Speisegebieten und mit je einem Wechselrichter pro Gebiet haben deutlich gezeigt, dass an diesen Orten die Investition für einen Wechselrichter aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll ist.

Wird anstelle von einem Wechselrichter ein stationärer Energiespeicher eingesetzt, so ist dieser dank dem hohen Energiepreis von 18 Rp./kWh bereits ab einer jährlichen Energieeinsparung von > 102 MWh wirtschaftlich rentabel. An den Gleichrichterstandorten Voltastrasse, Morgarten und Dreispitz erreichen die Energiespeicher diesen Minimalwert aber nicht, weshalb an diesen Standorten kein rentables System resultiert. Dagegen sind die beiden Standorte St. Alban und Riehen mit einer jährlichen Energieersparnis von 277 MWh und 224 MWh vielversprechend. Die Amortisationszeit liegt bei 6 bis 8 Jahren.

Eine möglichst flächendeckende Senkung der ungenutzten Bremsenergie im BVB-Netz scheint also in erster Linie mit einer kombinierten Massnahme-Variante sinnvoll zu sein. Die simulierte Gesamtvariante mit Berücksichtigung der drei erweiterten Speisegebiete Voltastrasse, Morgarten und Dreispitz, den beiden Wechselrichtern St. Alban und Riehen sowie der Erhöhung der Rekuperationsspannung zeigt eine mögliche Zukunftslösung hierfür. Dabei kann bei einer Investitionssumme von ungefähr 960 kCHF jährlich rund 283 kCHF eingespart werden. Daraus resultiert ein Break-even (Amortisationsdauer) von

gut 3 Jahren. Würden anstelle der Wechselrichter stationäre Energiespeicher eingesetzt, beträgt die Amortisationsdauer dank dem vergleichsweise deutlich höherem Energiepreis nur rund 2 Jahre.

Aus ökologischer Sicht (Nutzen der ungenutzten Bremsenergie oder umweltbedenkliche Entsorgung von Batterien bei Batteriespeichern, sofern nicht Schwungmassenspeicher) ist der Einsatz eines Wechselrichters wohl zu bevorzugen. Aus wirtschaftlichen Aspekten ist die Wechselrichter-Lösung momentan aber wesentlich schlechter, da beim Energiespeicher die Kosten für die Energie, die Netznutzung als auch Anteil Amortisation der Gleichrichteranlagen gespart wird und beim Wechselrichter eben nur die reinen vergüteten Energiekosten. Diese sind aktuell rund um Faktor 3 tiefer.

Da der Wechselrichter jedoch mit den betrachteten Parametern nur knapp nicht rentabel ist, aber aus ökologischer Sicht besser als der Energiespeicher ist, wird empfohlen, die Massnahmen, insbesondere allfällig erzielbare Energiepreise für die Rückvergütung, im Detail zu prüfen, bevor ein Entscheid für eine der beiden Technologie getroffen wird.

Weitere Anmerkungen: Es wäre auch eine gemischte Anwendung im Netz denkbar. Und bei den Betrachtungen wurden allfällige Synergien bei der Beschaffung von mehreren Energiespeichersystemen, welche zu Preisreduktion führen könnten, nicht berücksichtigt.

8.9 Weitere Erkenntnisse

8.9.1 Bedarfsabhängige Steuerung der Weichenheizungen

Zur Berechnung der Grundvariante wurde der Nutzen von einer bedarfsabhängigen Weichensteuerung untersucht (Reduktion der jährlichen Einsatzzeit um 2/3). Die Simulationsergebnisse für die Grundvarianten zeigen, dass eine Anpassung der Weichenheizsteuerung aus Sicht Energiesparen sicher sinnvoll ist. Zwar kann mit bedarfsgesteuerten Weichenheizungen weniger Bremsenergie genutzt werden, jedoch sinkt der jährliche Gesamtenergieverbrauch um rund 3 % (1'177 MWh). Dies entspricht bei einem Energiepreis von 9 Rp./kWh einer jährlichen Einsparung von 106 kCHF.

8.9.2 Ersatz der Cornichon-Flotte

Im Rahmen der Untersuchung einer Systemspannungs-Erhöhung wurde das Referenzszenario 101xx (Grundvariante 3) simuliert. Es beinhaltet 600 VDC Systemspannung und Flexity-Trams anstelle der Cornichon-Trams, welche nicht rückspeisefähig sind. Im Vergleich zur Grundvariante 2, in welchem die Cornichon-Trams berücksichtigt sind, kann der Gesamtenergieverbrauch dank den neuen rückspeisefähigen Fahrzeugen um rund 69 MWh verringert werden. Gleichzeitig steigt aber auch der Anteil an ungenutzter Bremsenergie um jährlich 45 MWh.