

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 101 (2010)
Heft: 12

Artikel: Schwungrad als Energiespeicher in Bahnnetzen
Autor: Bischof, Michael
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856161>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Schwungrad als Energiespeicher in Bahnnetzen

Erfahrungen aus einem Versuchsprojekt in der Stadt Zürich

Immer wieder wird über das enorme Energiesparpotenzial gesprochen, das der Einsatz eines Energiespeichers in Bahnnetzen bieten soll. EWZ und VBZ wollten es genau wissen und haben einen sechswöchigen Versuch durchgeführt. Dabei konnten wertvolle Erkenntnisse und Erfahrungen gesammelt werden.

Michael Bischof

In einem fahrenden Fahrzeug sind, je nach Masse und Geschwindigkeit, grössere Mengen an kinetischer und potenzieller Energie gespeichert. Um eine Bremswirkung zu erzielen, muss ein Teil dieser Energie wieder abgegeben werden. Mechanische Bremsen wandeln die Energie in Wärme um und geben sie an die Umgebung ab. Ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug bietet zusätzlich die Möglichkeit einer Umwandlung der kinetischen in elektrische Energie. Jedoch resultiert nur dann eine Bremswirkung, wenn für die so erzeugte elektrische Energie ein Verbraucher vorhanden ist.

Ein rekuperationsfähiges elektrisches Fahrzeug, beispielsweise ein Tram oder ein Trolleybus, generiert auf diese Weise grosse Energiemengen, welche wieder ins Fahrleitungsnetz zurückgespeist und von anderen Fahrzeugen genutzt werden können. Ist aber zum Zeitpunkt des Bremsvorgangs kein Abnehmer im Netz vorhanden, muss die Bremsenergie über Widerstände abgebaut werden.

Ausgangslage

Das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (EWZ) unterhält und betreibt in der Stadt Zürich 42 Gleichrichterstationen und generiert Traktionsenergie für die Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich (VBZ) bzw. deren Trams und Trolleybusse. Dabei werden Diodengleichrichter eingesetzt, die nicht rückspeisefähig sind. Der Einsatz von Vierquadrantenstellern – um Bremsenergie ins Mittelspannungsnetz zu liefern – stellt, wie dieser Versuch bestätigt hat, keine lohnenswerte Option dar. Eine effiziente Nutzung der Bremsenergie wird aber

durch einen als Sparspeicher eingesetzten Energiespeicher möglich. Der Speicher wirkt als Abnehmer, wenn die Energie gerade nicht an ein anderes Fahrzeug abgegeben werden kann. Wenn ein Fahrzeug mit seiner Unterstützung beschleunigt, wirkt er als Generator und gibt die gespeicherte Energie wieder ab. So kann die Effizienz des Rekuperationsprozesses erheblich gesteigert und Energie gespart werden.

Ein Energiespeicher kann aber auch zur Stabilisierung der Fahrleitungsspannung eingesetzt werden. Auf langen, im Stich erschlossenen Streckenabschnitten kann es vorkommen, dass die Spannung sehr tief absinkt, wenn ein Fahrzeug zur Beschleunigung kurzzeitig grosse Energiemengen bezieht. Zur Entlastung des Gleichrichters kann in

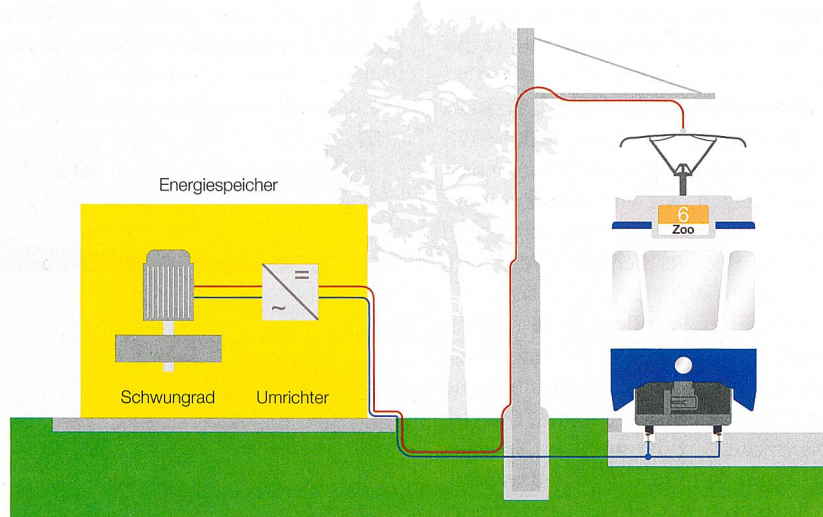
diesem Fall ein Energiespeicher als zweite Energiequelle eingesetzt werden, der wie eine zweiseitige Einspeisung eine Stabilisierung der Spannung bewirkt.

In Deutschland und weiteren Ländern Europas werden Energiespeicher bereits erfolgreich in Strassenbahnnetzen eingesetzt. Auch in der Schweiz wurde ein Einsatz mehrmals in Betracht gezogen, jedoch wegen ökonomischer Bedenken und aus Mangel an Erfahrungswerten bisher nicht realisiert. Mit diesem Versuch sollten die fehlenden Grundlagen erarbeitet werden.

Versuchsziele

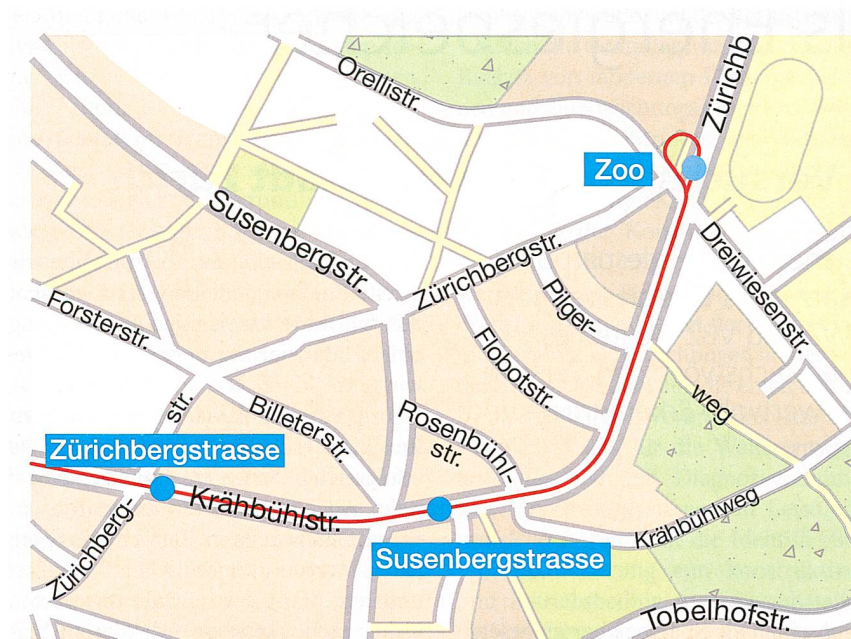
Folgende Ziele wurden mit diesem Versuch verfolgt:

- Aufzeigen von ökologischem und ökonomischem Mehrwert, welcher ein Speichereinsatz im VBZ-Netz bringt.
- Sammeln von Betriebserfahrungen, sowohl im Spar- als auch im Stützbetrieb.
- Suchen eines optimalen Standorts und Simulation des dort zu erwartenden Sparpotenzials.
- Falls nötig, Lösungen zur weiteren Optimierung entwickeln.
- Erfahrungen im Bezug auf Lärm- und EMF-Emissionen sammeln.



Prinzip eines stationär aufgestellten Schwungradenergiespeichers.

EWZ



Versuchsstrecke zwischen den Haltestellen Zoo und Zürichbergstrasse.

- Evaluation der optimalen Speichertechnologie für den Einsatz in der Stadt Zürich.
- Aufmerksamkeit und Sensibilisierung der Bevölkerung.

Der Versuch

Mit dem Versuchsprojekt «Energiespeicher» wurden erstmals Betriebserfahrungen und konkrete Messwerte während eines realen Einsatzes gesammelt. Als Energiespeicher wurde eine Powerbridge-Bahn von Piller Power Systems in einem Leihcontainer eingesetzt. Als Teststrecke diente der Streckenabschnitt zwischen den Haltestellen Zoo und Zürichbergstrasse. Auf dieser rund 800 m langen Strecke werden 60 m Höhendifferenz überwunden.

Allein auf dieser Strecke produzieren die Trams theoretisch über 200 000 kWh elektrische Energie pro Jahr. Der Versuch sollte aufzeigen, wie viel davon von anderen Fahrzeugen verbraucht werden kann bzw. wie viel sich durch den Einsatz eines Speichers einsparen lässt.

Die speisende Gleichrichterstation versorgt ein grosses Gebiet mit mehreren Tram- und Trolleybuslinien, die über eine Sammelschiene verbunden sind. Die Versuchsstrecke darf darum nicht als abgeschlossenes System betrachtet werden. Der Austausch von Bremsenergie findet auch über die Grenzen der einzelnen Versorgungsabschnitte hinaus statt, was

eine komplexe Analyse der Energieflüsse erforderte.

Ergebnisse Sparbetrieb

Ein Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Messung hat ergeben, dass im Versorgungsgebiet der speisenden Gleichrichterstation auch ohne Energiespeicher bereits 85% der Bremsenergie genutzt werden. Ermöglicht wird dies durch die enge Vermaschung des Bahnnetzes und den dichten Fahrplan. Somit bleiben gerade mal 15% der gesamten Bremsenergie übrig, um eingespart zu werden. Das ist deutlich weniger, als im Vorfeld angenommen wurde.

Im betrachteten Versorgungsgebiet könnten pro Jahr – unter idealen Bedingungen – 16 000 kWh Energie gespart

werden. Das ist deutlich zu wenig, um eine wirtschaftliche Speicherlösung zu finden. Die ungenutzte Energiemenge ist zu gering oder, anders gesagt, die Bremsenergie wird bereits sehr gut genutzt. Ausserdem kann ein Speicher nur während ca. 9 Monaten eingesetzt werden, da im Winter Wagen- und Weichenheizungen die gesamte Bremsenergie verschlingen.

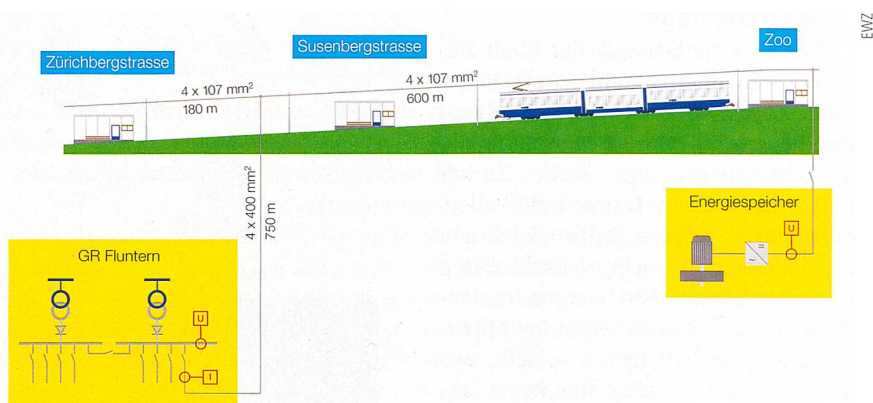
Ob ein Speichereinsatz wirtschaftlich ist, hängt stark von der Art der Bahn ab. Erfahrungsbereiche aus Deutschland haben gezeigt, dass ein wirtschaftlicher Sparbetrieb durchaus möglich ist. Jedoch unterscheiden sich diese Bahnen in folgenden, wesentlichen Punkten von denen der VBZ:

- Es wird mit höherer Geschwindigkeit gefahren.
- Die Fahrzeuge sind schwerer.
- Die Vermaschung des Bahnnetzes ist gering bis inexistent.

Da die speicherbare Bremsenergie linear zur Masse und quadratisch zur Geschwindigkeit zunimmt, gilt: Je schwerer die Fahrzeuge und je höher die Geschwindigkeit, desto mehr rekuperierbare Bremsenergie steht zur Verfügung.

Ergebnisse Stützbetrieb

Ein fahrendes Tram oder ein fahrender Trolleybus hat nie eine konstante Fahrleitungsspannung zur Verfügung. Einerseits wirken sich Spannungsschwankungen aus den übergeordneten Spannungsebenen direkt auf die Fahrleitung aus. Einen viel grösseren Einfluss auf die Spannung haben aber Spannungsabfälle auf den Leitungen, in Transformatoren und in den Gleichrichtern. Diese treten immer auf, wenn ein Fahrzeug Energie bezieht. Ein Spannungseinbruch verstärkt sich, je weiter sich das Fahrzeug vom Einspeisepunkt entfernt und je mehr Strom es bezieht. Das hat zur Folge, dass



Streckenprofil der Versuchsstrecke.

auf langen, im Stich erschlossenen Strecken die Spannung lokal auf sehr tiefe Werte absinken kann. Fällt die Spannung unter die in der EN 50163 (Bahnanwendungen – Speisespannungen von Bahnnetzen) definierten Grenzwerte, sind oft grosse Investitionen nötig, um das Problem zu beheben. Übliche Lösungen sind z. B. die Verstärkung von Fahr- und Rückleitungen, zweiseitige Einspeisungen oder der Bau von neuen Gleichrichterstationen. Jede dieser Lösungen ist mit grossen Investitionskosten verbunden. Eine kostengünstige Alternative stellt hier der Einsatz eines Energiespeichers zur Spannungsstabilisierung dar.

In dieser Funktion ist der Energiespeicher fast vollständig aufgeladen. Fällt die Fahrleitungsspannung unter einen definierten Grenzwert, beginnt der Energiespeicher ins Netz zurückzuspeisen und stabilisiert so die Spannung. Sobald sich die Spannungsverhältnisse wieder normalisiert haben, wird er sich wieder aufladen. Zur Ladung wird vorwiegend Energie aus dem Gleichrichter bezogen. Falls vorhanden, wird auch die Bremsenergie der Fahrzeuge verwendet.

Die Ergebnisse dieses Versuchs waren durchaus überraschend. Neben der Eigenschaft, die Fahrleitungsspannung hervorragend zu stabilisieren, kann sogar zusätzlich Bremsenergie eingespart werden. Das macht den Energiespeicher zu einer besonders ökologischen wie auch ökonomischen Lösung. Abgesehen davon, dass Anschaffungs- und Wartungskosten viel tiefer sind als bei alternativen Lösungen, sprechen Vorteile wie geringer Platzbedarf, geringe Verlustleistung und optimale Nutzung von Bremsenergie klar für den Energiespeicher. Einzig die im Vergleich geringere Lebensdauer kann als Nachteil empfunden werden. Aber auch unter Berücksichtigung eines Altersersatzes ist ein Energiespeicher oft einfacher und günstiger zu realisieren als eine Gleichrichterstation oder eine zweiseitige Einspeisung des betroffenen Fahrleitungsabschnitts.

Hohe Verluste

Energiespeicher, egal welcher Bauart, haben relativ hohe Eigenverluste, welche nicht vernachlässigt werden dürfen. Der für das Versuchsprojekt eingesetzte Energiespeicher wies sogar eine so hohe Verlustleistung auf, dass schliesslich mehr Energie verbraucht als gespart wurde. Bei der Wahl eines Energiespeichers darf dieser Aspekt nicht ausser Acht gelassen werden.



Pillar Powerbridge Bahn im Einsatz bei der Haltestelle Zoo.

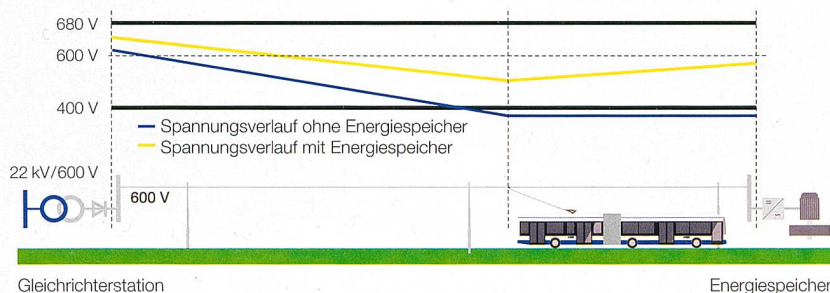
Neben den hohen Verlusten hat sich gezeigt, dass auch der Regelalgorithmus Optimierungspotenzial aufweist. Die verwendete Regelung arbeitet mit festen Grenzwerten, die sich an der Leerlaufspannung des Gleichrichters orientieren. Da die Leerlaufspannung aber ständig variiert, ist es sehr schwierig, den Speicher optimal zu parametrieren. Der eingestellte Grenzwert ist immer ein Kompromiss aus zu viel oder zu wenig Ladeenergie. Eine optimale Regelung würde die Messung des Gleichrichterstroms mit einbeziehen und so den Grenzwert laufend adaptieren.

Emissionen

Im Verlauf des Versuchsprojekts wurden diverse elektrische Messungen und Messaufzeichnungen gemacht. Ziel der Messungen war es, die Lastflüsse im Netz

zu verstehen, um den Energieertrag berechnen zu können. Zusätzlich wurden auch nicht elektrische Messungen betreffend elektromagnetischer Felder (EMF) und Schallemissionen durchgeführt. Solche Erkenntnisse sind wichtig, um einen geeigneten Aufstellort zu finden.

Grundsätzlich handelt es sich beim eingesetzten Energiespeicher um eine Gleichstromanlage. Im Zwischenkreis des Umrichters fliessen jedoch hohe Wechselströme mit drehzahlabhängigen Frequenzen. Zusätzlich verursacht der Umrichter Oberschwingungen. Daraus resultieren starke magnetische und elektrische Wechselfelder. Die Hersteller solcher Anlagen müssen zur Eindämmung solcher Felder einen grossen Aufwand betreiben. Mit grossen Drosseln wird unter anderem verhindert, dass sich die hochfrequenten Schwingungen im Netz



Prinzip der Spannungsstabilisierung mit einem Energiespeicher.



Die Messung der Schallemissionen wurde nachts in Zusammenarbeit mit der Empa durchgeführt.

ausbreiten oder gar auf die Fahrleitung aufmoduliert werden. Die Fahrleitung würde wie eine Antenne wirken und kann ein Störfeld verursachen, welches in der Lage ist, beispielsweise Ampelanlagen zu beeinflussen.

Die Messung der elektromagnetischen Felder hat wie erwartet keine Überschreitung von Grenzwerten ergeben. Die eingesetzte Anlage kann an allen Orten ohne empfindliche Nutzung betrieben werden. Eine Messung der elektrischen Felder machte aufgrund der äusseren Einflüsse keinen Sinn.

Bei der Aufstellung einer Anlage wie dem Energiespeicher in Wohngebieten muss immer auch die zu erwartende Lärmbelastung geklärt werden. Während des Betriebs des Energiespeichers hat sich gezeigt, dass dieser zwar nicht laute, doch aber deutlich hörbare Geräusche

von sich gibt. Am deutlichsten ist die Maschine im Bereich des Lüftungsaustritts mit einem starken hochfrequenten Anteil hörbar. Gemeinsam mit der Empa wurde eine Messung der Schallbelastung durchgeführt. Gemessen wurde der Schalldruckpegel bei verschiedenen Betriebssituationen. Dabei wurde deutlich, dass die geforderten Planungsgrenzwerte zwar eingehalten werden, Anwohner sich aber trotzdem gestört fühlen können. Die Lärmfrage muss auf jeden Fall bei der Planung berücksichtigt werden.

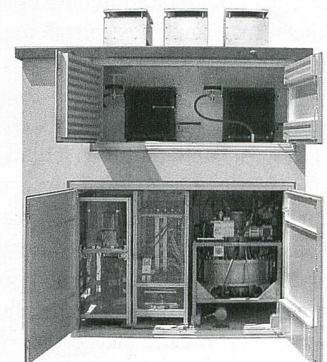
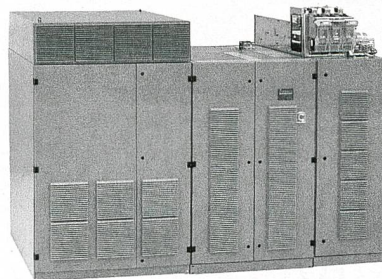
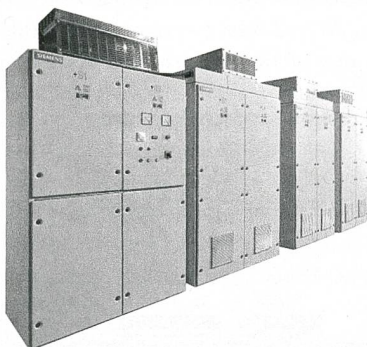
Alternative Speichertechnologien für Bahnnetze

Sobald man sich mit Energiespeichern befasst, werden sofort Fragen zur Speichertechnologie laut. Zur Speicherung von Bremsenergie im Bahnbereich kommen zurzeit nur zwei Technologien

infrage, welche bereits Marktreife erlangt haben. Zum einen sind dies die elektrischen Speicher, also Kondensatoren, zum anderen mechanische Speicher in Form von Schwungrädern. In einer Marktstudie wurden ausschliesslich Energiespeicher zur stationären Aufstellung und für Betriebsspannungen von 600 bis 750 V (Gleichspannungen) betrachtet. Ein mobiler Einsatz direkt auf dem Fahrzeug wurde nicht untersucht, da ein Umrüsten von bestehenden Fahrzeugen sehr aufwendig und teuer wäre. Ausserdem ist fraglich, ob wirklich eine Einsparung erzielt werden kann, da aufgrund des enormen Gewichts mehr Traktionsenergie benötigt würde.

Folgende marktreife Energiespeicher wurden verglichen:

- **Siemens Sitras SES.** Dies ist ein elektrischer Energiespeicher mit Doppelschichtkondensatoren. Es ist momentan das einzige marktreife Produkt, das auf diese Technologie setzt. Obwohl Kondensatorspeicher eine zukunftsweisende Technologie darstellen, benötigen sie noch sehr viel Platz, weisen eine vergleichsweise geringe Energiedichte und eine Lebensdauer von nur 10 Jahren auf. Ausserdem muss ein grosser Aufwand für die Kühlung der Kondensatoren betrieben werden, da sonst die Lebensdauer drastisch sinkt.
- **Piller Powerbridge Bahn.** Piller hat mit der Powerbridge einen langsam drehenden Stahlschwungradspeicher auf dem Markt, der ursprünglich für den Betrieb in Notstromanlagen entwickelt wurde, aber auch in Bahnnetzen zum Einsatz kommt. Bei der Entwicklung wurde grosser Wert auf Zuverlässigkeit und Langlebigkeit ge-



Siemens AG, Mobility Division/Piller Power Systems/Rosseta Technik GmbH

Von links: Siemens Sitras SES, Piller Powerbridge Bahn, Rosseta T2.

legt. Für Bahnanwendungen besteht aber noch Optimierungsbedarf: Durch eine Reduktion der Verluste und einer Optimierung der Regelung kann der Energieertrag weiter gesteigert werden.

- Rosseta T2. Der schnell drehende Schwungradspeicher T2 der Rosseta Technik GmbH besitzt eine Schwungradmasse aus Kohlefaser, die für Drehzahlen von bis zu 25 000 Umdrehungen pro Minute ausgelegt ist. Entwickelt, um Bremsenergie in Bahnnetzen zu speichern, fällt dieses Modell vor allem durch die geringen Verluste und die optimierte Regelung auf. Auch der Wartungsaufwand fällt dank Pumpen mit Magnetkupplung und Keramik-

lagern äusserst gering aus. Bis auf einen jährlichen Ölwechsel soll die Anlage während 20 Jahren wartungsfrei betrieben werden können. Jedoch bestehen erst zwei Referenzanlagen, welche noch nicht sehr lange in Betrieb sind.

Fazit

Die Auswertung der Messdaten hat gezeigt, dass ein Energiespeicher, der ausschliesslich zum Energiesparen eingesetzt werden soll, im Netz der VBZ nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Bei Bahnen mit abweichender Netztopologie und schnelleren, schwereren Fahrzeugen kann bedeutend mehr Energie gespart werden.

Viel eher tritt in der Stadt Zürich das Problem auf, dass die Fahrleitungsspannung in Hochlastsituationen sehr tief absinkt. Führt das zu Einschränkungen im Fahrbetrieb, stellt der Energiespeicher eine sowohl umweltfreundliche als auch wirtschaftliche Lösung dar.

Literatur

- Michael Bischof, EWZ: Versuchsprojekt «Energiespeicher» (Schlussbericht zum Versuch), Zürich, 2010.
- Rosseta Technik GmbH: Abschlussbericht Energiespeicherwerk Zwickau, Rosslau (D), o.J.
- Rosseta Technik GmbH: Energiespeicher für das Strassenbahnnetz, Rosslau (D), 2006.
- Dr. Frank Täubner, Rosseta Technik GmbH: Reduzierung des Energiebedarfs durch Schwungradspeicher, Rosslau, o.J.
- J. Schulze, S. Nydegger, Enotrac AG: Evaluation des Einsatzes stationärer Energiespeicher bei Bernmobil, Thun, 2009.
- Frank Steinhorst, Ingo Jonassen, Arne Peters: Mit Schwung Energie sparen, Der Nahverkehr, 6/2008.

Links

- www.ewz.ch/ndl
- www.rosseta.de
- www.piller.com
- www.mobility.siemens.com

Angaben zum Autor



Michael Bischof, BSc FHO in Elektrotechnik, Projektierung Netzdienstleistungen bei EWZ, ist unter anderem verantwortlich für Dienstleistungen im Bereich Energiedatenmanagement und Netzqualitätssysteme und realisierte als Projektleiter das Versuchsprojekt

«Energiespeicher».

EWZ, 8050 Zürich, michael.bischof@ewz.ch

Résumé

Volant d'inertie en tant qu'accumulateur d'énergie dans les réseaux de transports publics

Expériences avec un projet pilote à Zurich

Grâce à la mise en œuvre d'un accumulateur d'énergie, le potentiel d'économies énergétiques résultant principalement de l'énergie de freinage des transports publics peut être utilisé. Afin de déterminer le potentiel réel des économies possibles, le Service d'électricité et les Transport publics de la Ville de Zurich ont réalisé un test de six semaines avec un accumulateur d'énergie à volant d'inertie, ce qui leur a permis de rassembler de précieuses données et expériences. L'évaluation des données de mesure a révélé qu'un accumulateur d'énergie utilisé exclusivement dans le but d'économiser de l'énergie ne peut pas être exploité d'un point de vue économique dans le réseau des Transports publics de la Ville de Zurich. Ce réservoir d'énergie reste pourtant une solution à la fois économique et respectueuse de l'environnement pour renforcer la tension de la caténaire dans les situations de haute charge.

No

Anzeige

Ihr Spezialist für Transformatoren und Netzbau

trafopower ag
Grundstrasse 36
CH - 5012 Schönenwerd
Tel. +41 (0) 62 849 90 10
Fax +41 (0) 62 849 90 11



Analyse - Instandhaltung - Revision - Verkauf

Im Einsatz für die Werterhaltung elektrischer Anlagen.

info@trafopower.ch

www.trafopower.ch