



Energiespeicher für das Straßenbahnnetz

(Stand 08/06)

rosseta Technik GmbH

Karl-Liebknecht-Straße 38
06862 Roßlau / Elbe

Tel. 034901 52040
Fax 034901 949471

www.rosseta.de
post@rosseta.de



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

2 Wirkungsweise des Energiespeichers

2.1 Straßenbahnnetz ohne Energiespeicher

2.2 Straßenbahnnetz mit Energiespeicher

2.3 Anschluss zwischen zwei Unterwerken

3 Das Energiespeichersystem

3.1 Aufbau

3.2 Funktionsweise

3.3 Sicherheitskonzept

3.4 Wartung

3.5 Wirtschaftlichkeit

4 Referenzen

5 Technische Daten

6 Technische Details



1 Einleitung

Die rosseta Technik GmbH fertigt einen Energiespeicher, der durch ein innovatives Konzept und die Anwendung neuartiger Technologien ein besonders hohes Leistungsvermögen erreicht.

Der Einsatz solcher Energiespeicher an der Strecke von elektrischen Nahverkehrsmitteln wie Straßenbahnen bietet sich an, da in solchen Netzen hohe Leistungsschwankungen auftreten. Der von den Bahnen nicht verbrauchte Teil der Bremsenergie wird in einem Schwungrad zwischengespeichert und beim Anfahren der Bahnen wieder abgegeben. Dadurch können die Leistungsspitzen im Netz auf etwa 70% reduziert werden. Es kann ein Energiebetrag von 20 bis 30 % eingespart werden.

Durch Nutzung eines eigenen Computerprogramms kann der Energiefluss im Netz in Abhängigkeit von der Streckengeometrie und dem Fahrplan berechnet werden und eine optimale Anordnung von Unterwerken und Energiespeichern vorgeschlagen werden.

Während der Umstellung auf rückspeisefähige Fahrzeuge ist der gleichzeitige Aufbau von Energiespeichern an der Strecke besonders sinnvoll, da nur so die rückgespeiste Bremsenergie vollständig im Netz genutzt werden kann. Ohne Energiespeicher bleibt je nach Streckenverlauf und Fahrplan 40 bis 60 % der Bremsenergie ungenutzt.

Der Energiespeicher der rosseta Technik GmbH ist optimal an die Anforderungen des Straßenbahnnetzes angepasst worden. Er verfügt über eine vollautomatische Betriebsführung und ein internes Sicherheitssystem. Der Energiespeicher besitzt eine Dauerleistung von 500 kW, diese kann kurzzeitig auf 750 kW erhöht werden. Sein Energieinhalt ist für die Aufnahme der Bremsenergie von zwei Straßenbahnen ausreichend.

Der Energiespeicher wird stationär an das Netz angeschlossen. Er hat einen geringen Platzbedarf von nur 2 x 3 m und wiegt mit Betoncontainer 10 t.

Energieeinsparungen von 20 bis 30 % wurden anhand von Beispielrechnungen für konkrete Straßbahnnetze (Potsdam, Dessau, Teilabschnitte für Halle und Zwickau) ermittelt.

In den folgenden Abschnitten wird näher auf die Wirkungsweise und den Aufbau des Energiespeichersystems eingegangen. Weitere Erläuterungen finden sie in der Internet-Seite www.rosseta.de, die jeden Monat aktualisiert wird.

2 Wirkungsweise des Energiespeichers

2.1 Straßenbahnnetz ohne Energiespeicher

Zunächst betrachten wir den Zustand ohne Energiespeicher. Die Energieverbrauchsberechnung zeigt Abb. 1, hier am Beispiel der Niederflrbahn MGT 6D der Strecke 1 der HAVAG Halle in Richtung "Frohe Zukunft". Wenn die Straßenbahn bremst, werden im Durchschnitt ca. 0,2 kWh in das Netz zurückgespeist. Das sind 20 % der Bremsenergie. Beim Anfahren werden dagegen 1,77 kWh aus dem Unterwerk benötigt.

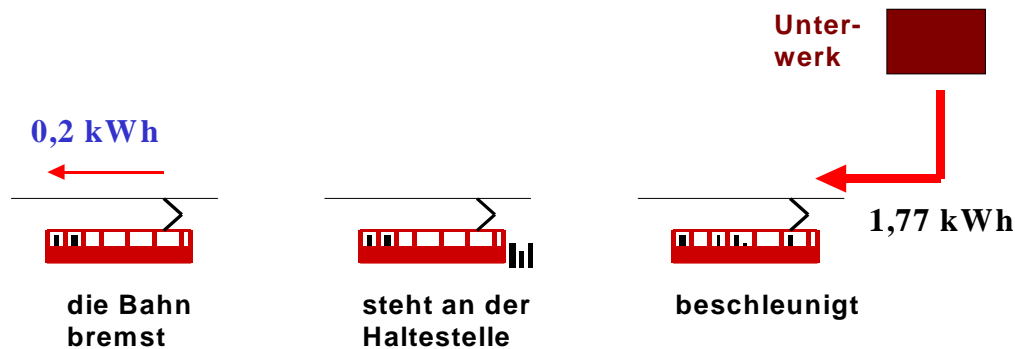


Abb. 1 Fahrzyklus ohne Energiespeicher für eine MGT 6D mit 50 km/h

2.2 Straßenbahnnetz mit Energiespeicher

Wenn ein Energiespeicher an das Netz angeschlossen wird, ändert sich das Bild nach Abb. 2 wesentlich. Die 0,2 kWh Bremsenergie werden wie vorher von der Bahn selbst und von anderen Bahnen genutzt. Der Energiespeicher kann den bisher ungenutzten Teil der Bremsenergie von 0,8 kWh pro Bremsung aufnehmen. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads werden 0,75 kWh zwischengespeichert. Beim Beschleunigen werden nur noch 1,10 kWh aus dem Unterwerk benötigt. Für einen Fahrzyklus ergibt sich mit Energiespeichersystem eine Energieeinsparung von 38 %.

In dem Berechnungsmodell wurden der Fahrplan, die Streckenführung, der Stromverbrauch durch Heizung und Zusatzaggregate in der Bahn und im Energiespeichersystem und die Verluste im Bahnnetz erfasst. Für das Netz ergibt sich dann eine Energieeinsparung von 20 bis 25 % in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte.

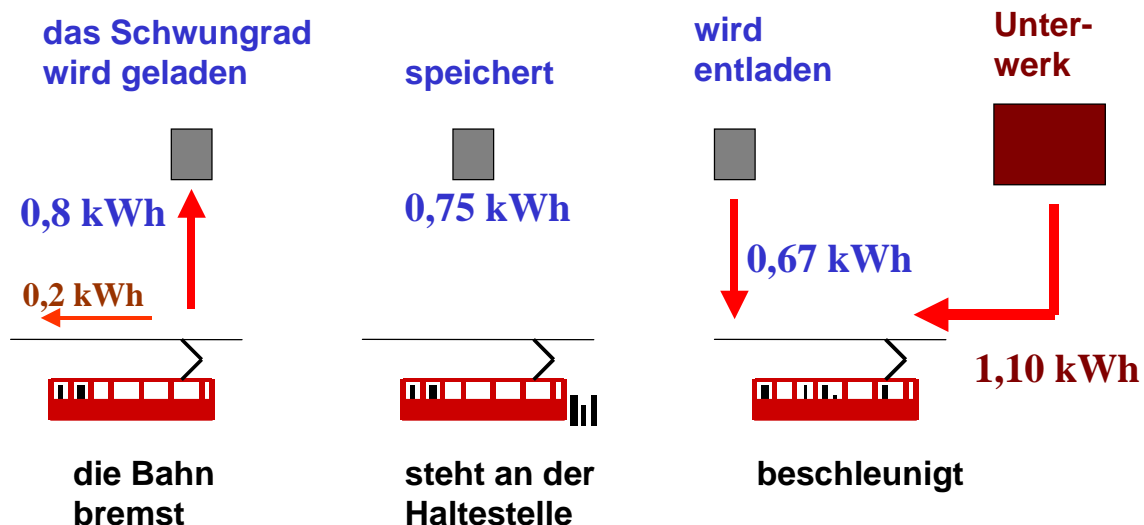


Abb. 2 Fahrzyklus analog Abb. 1 mit Energiespeicher T2

2.3 Anschluss zwischen zwei Unterwerken

5 % Netzverluste können zusätzlich eingespart werden, wenn der Energiespeicher zwischen zwei Unterwerken angeschlossen wird. In diesem Fall gibt es einen weiteren positiven Effekt, die Schwankungen der Fahrspannung werden wesentlich reduziert. Sowohl die Spannungsmaxima verschwinden, da der Bremsstrom sofort in den Speicher fließen kann. Aber auch die gefährlichen Spannungseinbrüche werden durch das Rückspeisen der Energie aus dem Speicher in das Netz entschärft, wie in Abbildungen 3 und 4 dargestellt.

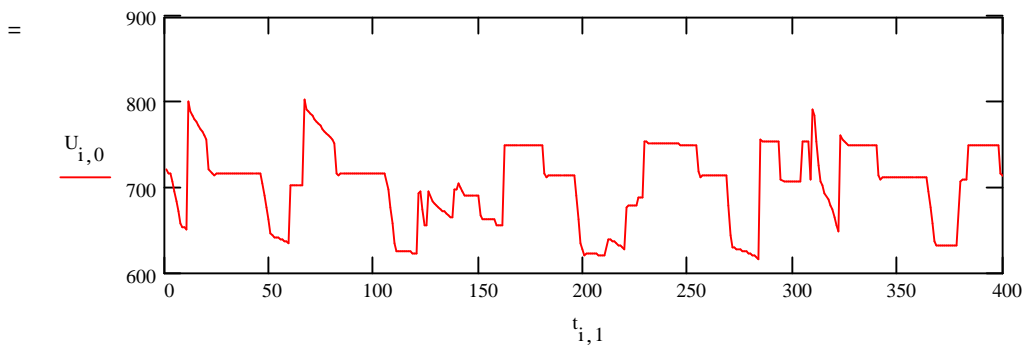


Abb. 3 Spannung am Fahrzeug in V aufgetragen über die Zeit in s, mit einem Energiespeicher am Netz während der Fahrt vom Steintor bis zur Frohen Zukunft

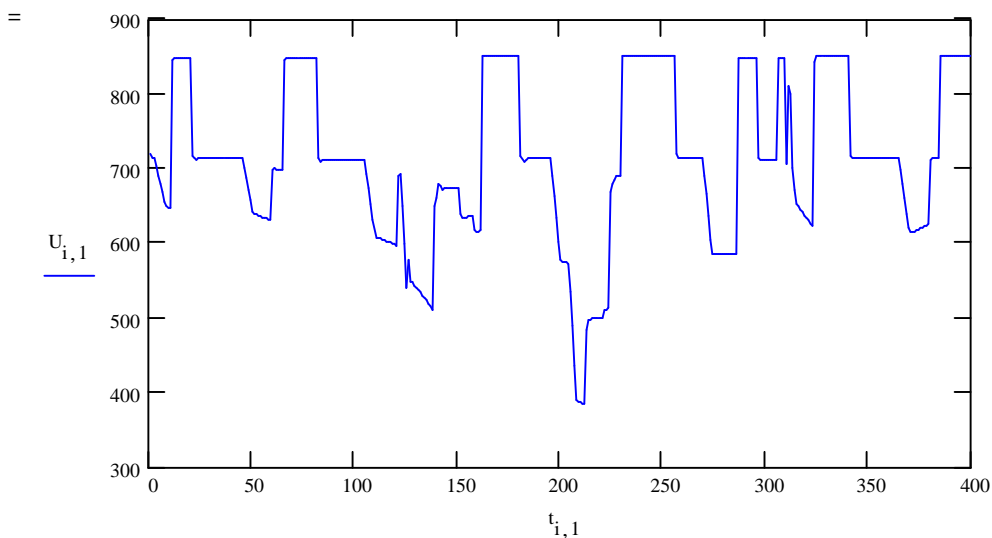


Abb. 4 Spannung am Fahrzeug in V über die Zeit in s, ohne Energiespeicher, während der Fahrt vom Steintor bis zur Frohen Zukunft

3 Das Energiespeichersystem

Das Energiespeichersystem der rosseta Technik GmbH

- ist für den Einsatz **im Straßenbahnnetz** entwickelt worden und entspricht optimal seinen **Anforderungen** hinsichtlich der speicherbaren Energie, Leistung, Platzbedarf und Wartungsaufwand.
- kann zwischen zwei Unterwerken in einem **Betoncontainer** direkt an das Netz angeschlossen werden oder zum **Einbau in Unterwerken** eingesetzt werden.
- erfordert **wenig Platz** und hat keine besondere Anforderungen an das Fundament.
- kann benutzt werden, um zwei bisher **getrennte Netzabschnitte** mit der erforderlichen Sicherheitseinrichtung zu koppeln.
- wird an das Bahnnetz **an einem Mast** durch ein Kabel und einen Trenner incl. Kabel für Schienenrückleiter und Bahnerde angeschlossen.
- kann mit einer Eigenversorgungseinheit geliefert werden und muss daher **nicht an das 400 V** - Netz angeschlossen werden



Abb. 5 Inbetriebnahme des Schwungradspeichersystems in Zwickau am 15.08.06

3.1 Aufbau



Abbildung 6 : Betoncontainer mit Energiespeicher

Das Energiespeichersystem besteht aus folgenden Komponenten:

Energiespeicher mit dem Grundrahmen (Abb. 6 unten rechts) mit dem Schwungradgehäuse, dem Vakuumsystem, der Wasserpumpe für den Schwungradkühlkreislauf, der Ölpumpe für den Schmierölkreislauf, einem Öl-Wasser-Wärmetauscher, dem Barrenschütz zum Zuschalten der Bremswiderstände und einer Heizung (ganz unten).

Leistungselektronik (Abb. 6 unten in der Mitte) mit dem wassergekühltem Wechselrichter, Stromvorgabesteuerung, Motordrosseln und einer Wasserpumpe für den Kühlkreislauf der Leistungselektronik.



Einspeiseeinheit (Abb. 6 unten links) mit Schnellschalter, Gleichstromdrossel, Blitzschutz, Gerüststromüberwachung, dem Stromwandler für die Messung des Eingangsstroms und den Anschlüssen für Bahnnetz und Rückleiter. Es werden hier die Erdkabel angeschlossen.

Eigenversorgungseinheit (links neben der Einspeiseeinheit, auf Abb. 6 nicht sichtbar) mit Geräten zur Erzeugung von 400 V AC, 24 V DC und 230 V AC, den Kabelüberwachungsgeräten und der Potentialüberwachung des Rückleiters.

Steuerschrank (auf der Rückseite des Schwungradspeichers, siehe Abb. 5) mit den Bedientasten, Messgeräten für Spannung des Bahnnetzes, Spannung des Schwungradmotors, Strom in oder aus dem Speicher, mit der SPS zur Überwachung des Schwungradspeichers und zur automatischen Steuerung, Zähler für gespeicherte kWh, Leittechnik und Mitnahmeeinrichtungen.

zwei Kühler mit Wasservorratsgefäßen (auf Abb. 6 oben)

drei Bremswiderstände (auf dem Dach des Betoncontainers) zum schnellen Abbremsen.

Betoncontainer mit Brandschutzwarnanlage, Beleuchtung, Türensicherungen, Notlicht und Lüftung.

Beim Einbau des Schwungradspeichers in ein Unterwerk werden nur der Energiespeicher mit Grundrahmen, die Leistungselektronik, die Einspeiseeinheit und der Steuerschrank vor Ort benötigt. Die Lüfter für den Kühlkreislauf können etwas entfernt oder sogar auf dem Dach untergebracht werden. Auf die Bremswiderstände und die Eigenversorgungseinheit kann in einem Unterwerk meist verzichtet werden.

3.2 Funktionsweise

Regime zur Energie-Einsparung

In diesem Fall ist der Speicher im Ruhezustand nahezu leer, d.h. das Schwungrad dreht sich mit der unteren Arbeitsdrehzahl von 15.000 Umdrehungen/min. Eine geringere Drehzahl ist nicht sinnvoll, da dann die Fähigkeit des Schwungrads zur Energieaufnahme abnimmt. Es wird gesichert, dass ein möglichst großer Teil der Bremsenergie aufgenommen und danach wieder ins Netz abgegeben werden kann. Sobald eine Straßenbahn bremst, steigt die Spannung der Fahrleitung an. Der Speicher schaltet sich zu und das Schwungrad wird beschleunigt. Nachdem die Netzspannung unter den Leerlaufwert fällt, speist der Speicher seine Energie wieder zurück.

Regime zur Spannungsstützung

Hierbei ist der Speicher im Ruhezustand nahezu voll geladen, das Schwungrad dreht sich mit 25.000 Umdrehungen/min. Spannungseinbrüche können sofort mit der vollen Leistung und Energie des Speichers ausgeglichen werden. Wenn dieser Fall auftritt, wird der Speicher wieder langsam aufgeladen, wobei entweder der Strom aus den benachbarten Unterwerken oder die Bremsenergie der Bahnen benutzt werden kann. Bei dieser Betriebsweise wird keine Energie-Einsparung erzielt, jedoch werden die Leistungsspitzen wirksam abgebaut.

Optimierung des Arbeitsregimes

Es ist zu erwarten, dass in den meisten Fällen ein Betrieb zwischen Spannungsstützung und Energie-Einsparung sinnvoll ist. Je nach Leistungsanforderung, Fahrplan und Netzsituation wird nach



der Inbetriebnahme eine Optimierung vorgenommen. Als Ergebnis kann in Abhängigkeit von der Tageszeit ein optimales Betriebsregime eingestellt werden.

Nachtbetrieb

Entsteht eine Betriebspause von über 3 Stunden, erfolgt die automatische Abschaltung des Schwungradspeichersystems. Die verbleibende Energie des Schwungrades wird für den Betrieb der Hilfsaggregate verwendet. Nach 3 Stunden hat das Schwungrad eine Drehzahl von weniger als 1000 Umdrehungen/min erreicht. Nach der Betriebspause erfolgt wieder die automatische Inbetriebnahme.

Kurzschluss an der Oberleitung

Wenn es beispielsweise durch einen Sturmschaden zum Kurzschluss der Oberleitung kommt, muss das Schwungradspeichersystem das erkennen, damit nicht die gesamte Energie des Schwungrades in die defekte Leitung gepumpt wird. Hierzu gibt es zwei Kriterien:

- der Stromanstiegswert übersteigt den Normalwert wesentlich
- die Spannung des Netzes bricht trotz Rückspeisung unter einen Mindestwert zusammen

Ein Überstrom ist nicht zu erwarten, da der Wechselrichter den Strom begrenzt.

Nach dem Erkennen des Kurzschlusses wird der Speicher vom Netz getrennt. Das Schwungrad läuft mit seiner eigenen Energie noch mindestens 3 Stunden, bis das Schwungrad steht. Dann schaltet die SPS alle Verbraucher aus und sich selbst von der Batterie ab. Erst wenn die Netzspannung wieder anliegt, wird das System wieder automatisch in Betrieb genommen.

Stromabschaltung

Wenn für Reparaturen oder andere Zwecke die Spannung der Fahrleitung abgeschaltet wird, registriert das die Stromvorgabekarte und schaltet das System vom Netz ab. Erst wenn die Spannung wieder anliegt, schaltet sich der Schwungradspeicher wieder zu. Auch hier erfolgt das Ab- und Anschalten wie im vorigen Abschnitt schon ausgeführt.

Abschaltung des Speichers

Wenn zu einer Inspektion oder aus anderen Gründen der Speicher abgeschaltet werden muss, erfolgt das durch den Schalter "Herunterfahren" am Schaltschrank. Daraufhin beginnt der Speicher möglichst viel Energie in das Netz zu speisen, bis das Schwungrad steht. Danach wird mit einer Signallampe die Abschaltbereitschaft angezeigt. Jetzt kann das System mit dem Hauptschalter ausgeschaltet werden.

Wenn der Hauptschalter vorher benutzt wird, werden zwar alle Hilfsaggregate, die SPS und der Leistungsschalter abgeschaltet, jedoch liegt dann noch Spannung am Schwungrad und damit an den Wechselrichtern an, da das Schwungrad sich ja noch dreht. Das Auslaufen des Schwungrades ohne Kühlung und ohne Vakuumpumpen kann zur Beschädigung des Faserverbundkörpers führen und sollte daher unterbleiben.

Das sofortige Bedienen des Hauptschalters am Speicher ist nur zulässig, wenn es eine Havarie gab und das Schwungrad offensichtlich beschädigt ist oder wenn Personen durch den elektrischen Strom gefährdet sind.



3.3 Sicherheitskonzept

Das Ziel des elektrischen Sicherheitskonzeptes ist es, Fehler in der Funktion des Schwungradspeichersystems zu erkennen und eine Gefährdung des Fahrbetriebes auszuschließen. Das Sicherheitskonzept verfügt über Bauteile, die für die elektrischen Bahneinrichtungen zwingend vorgeschrieben sind und darüberhinaus zusätzliche Bestandteile, die den Besonderheiten des Schwungradspeichersystems entsprechen:

Blitzschutz

Es sind Überspannungsableiter sowohl zwischen Speiseleitung und Schienenrückleiter als auch zwischen Schienenrückleiter und Erde direkt im Eingang des Schaltschranks vorhanden.

Prüfung des Potentials des Schienenrückleiters im Vergleich zur Erde

Wenn sich zwischen Schienenrückleiter und Erdanschluss ein Potential größer 120 V aufgebaut hat, wird das Schwungradspeichersystem vom Netz getrennt und heruntergefahren.

Prüfung des Erdstroms

Der Rahmen des Schwungrads und des Wechselrichters sind isoliert zur Erde aufgebaut. Die notwendige Erdung wird an einer Stelle vorgenommen. Dort wird gemessen, ob es einen Strom zur Erde gibt bzw. ob sich ein Gerüstpotential aufbaut. Wenn das der Fall ist, erfolgt ebenfalls die Abschaltung des Schwungradspeichersystems.

Überstromauslösung durch den Schnellschalter

Wenn der Strom im Schnellschalter 1200 A überschreitet, trennt der Schalter selbsttätig das Schwungradspeichersystem vom Netz.

Strommessung für Speisung und Rückleiter

Die Messung und Abschaltung wird durch den Wechselrichter initiiert, wenn der höchstzulässige Strom überschritten wird oder wenn zwischen beiden Messstellen eine Differenz größer als 35 A auftritt.

Prüfung des Wirkungsgrades des Schwungradmotors

Wenn durch den Stromfluss im Motor nicht die erwartete Beschleunigung des Schwungrads erreicht wird, liegt ein Fehler im Schwungradmotor vor. Durch die Messung von Eingangsstrom und Drehzahl wird dieser Fehler von der Stromvorgabekarte erkannt und das System ebenfalls abgeschaltet.

Messung der Phasenspannung des Schwungradmotors

Wenn ein Fehler in der Motorwicklung auftritt, äußert sich das in unterschiedlichen Wicklungswiderständen und damit in unterschiedlichen Phasenspannungen. Sobald eine Spannung um mehr als 20% abweicht, erfolgt die Abschaltung des gesamten Schwungradspeichersystems.

Sicherheit des Schwungrads

Das Schwungrad wird durch Sensoren mittels der Betriebsführungs-SPS überwacht. Sofern bei einem Sensor sich eine Grenzwertüberschreitung andeutet, wird ein Signal "Wartung erforderlich" ausgegeben. Der Betrieb des Systems ist dabei jedoch weiter möglich. Erst wenn die Messwerte so stark abweichen, dass eine Gefährdung für das System zu erkennen ist, wird das Schwungrad mit dem Signal Störung heruntergefahren.

Im Schwungradgehäuse befindet sich ein Berstschutz, der bei Havarien verhindert, dass das Gehäuse durch das Schwungrad zerstört werden kann. Daher sind keine weiteren Schutzmaßnahmen in Form von Einhausungen oder ähnlichem erforderlich.

Das Gehäuse ist mit nachgiebigen Drahtseilfedern am Rahmen befestigt, so dass ein Abreißen des Gehäuses in jedem Fall verhindert wird.

Ein Überdruckventil und ein Wasserreservebehälter sind weitere wichtige Sicherheitselemente des Systems.



3.4 Wartung

Der Energiespeicher ist für eine Lebensdauer von 20 Jahren bis zur ersten Hauptuntersuchung entwickelt worden.

Es werden nur Pumpen mit Magnetkupplung eingesetzt. Die Kugellager des Schwungrades sind Präzisionslager mit Öl-Innenschmierung, die durch eine doppelt elastische Aufnahme und eine Präzisionsauswuchtung bei voller Drehzahl nahezu belastungsfrei arbeiten. Dadurch wird eine Lagerlebensdauer von über 20 Jahren erwartet.

jährliche Wartungsarbeiten

- Ölwechsel der Vakuumpumpe
- Ölwechsel der Lager
- Reinigung des Wärmetauschers des Wasserkühlkreislaufs

- Diagnosemessung durch die rosseta Technik GmbH zur Prüfung des Gesamtzustandes des Systems und zur Früherkennung möglicher Fehler

3.5 Wirtschaftlichkeit

Energieeinsparung

Das System ist mit kalibrierten Energiezählern der Firma LEM ausgerüstet. Es kann abgelesen werden, welche Energiemengen vom Energiespeicher in das Netz zurückgespeist werden. Auf der Basis der kWh-Zähler kann genau berechnet werden, wie groß der Effekt der Energieeinsparung ist. Nach den bisher vorliegenden Berechnungen kann ein Energiespeicher der rosseta Technik GmbH eine Energiemenge von 200.000 bis 500.000 kWh pro Jahr je nach Standort und Auslastung einsparen.

Reduzierung der Leistungsspitzen

Der zusätzliche Nutzen, der durch eine Reduzierung der Leistungsspitzen im Unterwerk und durch die Verringerung der Netzverluste entsteht, kann nur durch Vergleichsmessungen in den Unterwerken bestimmt werden.

Kosten

Die Kosten für die kWh für Großabnehmer aus der Industrie lagen im Jahr 2000 bei 5,1 Cent und sind bis 2005 bereits auf 7,3 Cent gestiegen (Quelle VDEW). Dieser Trend wird sich in den nächsten Jahren fortsetzen. Bereits heute sind bis zu 10 Cent pro kWh üblich.

Für die Berechnung der Energieeinsparung über den Zeitraum der nächsten 20 Jahre kann wahrscheinlich ein Preis von 15 Cent pro kWh und höher gerechnet werden. Es ergibt sich abhängig vom Standort und den konkreten Bedingungen eine Amortisationszeit von 7 bis 14 Jahren. Konkrete Angebote und Kostenberechnungen senden wir auf Anfrage gern zu.



4 Referenzen

IMG gmbH Nordhausen (2002)

Ein Energiespeicher T1 mit einer Dauerleistung von 150 kW wurde im Jahr 2002 an das Institut für Maschinen, Antriebe und elektrische Gerätetechnik verkauft. Es wird dort auf Motorprüfständen für die Entwicklung einer Straßenbahn ohne Oberleitung eingesetzt.

aeras GmbH Clausthal-Zellerfeld (2004 - 2006)

Ein Energiespeicher wurde im Zeitraum von September 2004 bis März 2006 auf einem Prüfstand für die Entwicklung der Leistungselektronik getestet und nur mit einer einmaligen Überprüfung durch die rosseta Technik GmbH betrieben. Der Versuchsbetrieb diente der Entwicklung einer speziell angepassten Leistungselektronik.

Städtische Verkehrsbetriebe Zwickau GmbH (2006)

Im Januar 2006 erteilte die Planungsgesellschaft der rosseta Technik GmbH den Auftrag zum Aufbau eines Energiespeicherwerkes mit einem Schwungradspeicher an der Neubaustrecke nach Neuplanitz. Anfang Juni erfolgte bereits die Lieferung und Aufstellung des fertig ausgerüsteten Betoncontainers. Mitte August wurde das System an das Bahnnetz geschaltet und die Erprobung begonnen. Ab Oktober 2006 ist der Dauerbetrieb am Bahnnetz vorgesehen. Die erwartete Energieeinsparung beträgt 200.000 kWh pro Jahr.

Dessauer Verkehrs GmbH (2004 - 2006)

Auf dem Betriebshof der Dessauer Straßenbahn wurde im Frühjahr 2004 ein Betoncontainer für die Erprobung von Schwungrädern am Bahnnetz aufgebaut. Im Frühjahr 2006 erfolgte die Installation der erforderlichen Elektronik. Die Inbetriebnahme eines Energiespeichers ist für Ende 2006 vorgesehen. Die erwartete Energieeinsparung beträgt 154.000 kWh pro Jahr.

5 Technische Daten

	Energiespeicher im Betoncontainer	Energiespeicher für ein Unterwerk
Abmessungen		
Länge	3,00 m	2,60 m
Breite	1,80 m	1,00 m
Höhe	3,15 m ¹	1,60 m ²
Gewicht	10 t	1,5 t
Spannung	450 bis 1000 V	
Strom	- 1000 bis + 1000 A	
Leistung	500 kW	
Energieinhalt	6 kWh	
max. Drehzahl	25.000 Umdrehungen/min	
Wirkungsgrad	95 % (für das Aufladen oder Entladen)	
Leerlaufverluste		
Schwungrad	2 bis 5 kW je nach Drehzahl	
Zusatzaggregate	2,5 bis 3,1 kW	

¹ ohne Bremswiderstände

² ohne Kühler



6 Technische Details

Der Schwungradspeicher wurde von 1995 bis 2005 im Wissenschaftlich-Technischen Zentrum Roßlau und danach in der rosseta Technik GmbH entwickelt und hat eine Reihe von neuen technischen Lösungen. Diese waren die Voraussetzung für die hohe Leistungsfähigkeit bei einem geringen Gewicht, für die lange Lebensdauer und den geringen Wartungsaufwand.

Schwungrad

Es wird ein Kohlenstofffaser-Epoxidharz-Verbundwerkstoff verwendet, der auf speziell entwickelten Anlagen hergestellt und montiert wird. Dadurch gelingt es, die mögliche Festigkeit fast vollständig auszunutzen. Der Faserverbund hat ein Gewicht von 100 kg und einen Durchmesser von 700 mm. Bei der höchsten Drehzahl beträgt die Umfangsgeschwindigkeit 915 m/s, das sind 3.480 km/h und damit etwa die dreifache Schallgeschwindigkeit. Es versteht sich von selbst, dass im Schwungradgehäuse Vakuum herrschen muss, damit die Energie nicht durch Luftreibung verbraucht wird.

Die Verwendung eines Faserverbundes hat zwei Vorteile im Vergleich zu Stahlschwungrädern. Zum einen lassen sich bei ähnlichen Abmessungen wesentlich größere Mengen Energie speichern, da die erreichbaren Drehzahlen wesentlich höher sind.

Zum zweiten haben Faserverbundschwungräder ein gutmütiges Berstverhalten. Die größten Belastungen treten nahe am Schwungradrand auf. Bei einer Havarie lösen sich nur Faserbündel, die gegen den Berstring reiben. Die Energie wird dadurch vernichtet.

Lagersystem

Die Konstruktion einer geeigneten Lagerung war die zweite große Herausforderung. Für die Rotorenmasse von 165 kg und Drehzahl von 25.000 Umdrehungen/min wurde eine Lagerung mit Keramikugellagern entwickelt. Das hat drei Besonderheiten. Es erfolgt eine Schmierung von innen, so dass auch bei hohen Drehzahlen die Kugeln immer mit Öl versorgt werden. Ein Hubmagnet hält den Rotor in der Schwebe, so dass die Lager nur radiale Kräfte aufnehmen müssen. Der Rotor wird überkritisch gefahren, wodurch die Lagerkräfte im Betrieb gering sind.

Motorgenerator

Um einen möglichst leistungsstarken Motor auf der Welle des Schwungrads anordnen zu können, werden NdFeB-Magnete aufgeklebt und mit einer Kohlenstofffaser-Bandage auf die Welle gepresst. Die dazu erforderliche Technologie wurde entwickelt und wird auch anderen Firmen für den Aufbau von super schnellen Motoren zur Verfügung gestellt. Die Kühlung der Welle erfolgt durch einen Ölkreislauf im Vakuum, mit dem gleichzeitig die Lager geschmiert werden.

Aufhängung

Die mechanische Befestigung des Systems an dem Grundrahmen erfolgt elastisch durch Drahtseilfedern. Dadurch können Schwingungen und Stöße wirksam abgebaut werden und der Energiespeicher kann funktionsfähig transportiert werden. In dem Fall eines Blockierens von Motor oder Lager verhindern die Drahtseilfedern ein Losreißen des Schwungradgehäuses von der Befestigung, da die stoßartige Belastung wirksam gedämpft wird.