Reduzierung des Energiebedarfs durch Schwungradspeicher

Dr. Frank Täubner, rosseta Technik GmbH

Reducing of Energy Consumption by Flywheel Accumulators

A new flywheel accumulator store braking energy in the power range up to 30 kW. The flywheel accumulator has a very smooth running behaviour, does not emit any noise and can safely operated in the proximity of people. Its benefits include high output performance at a small footprint, cost-efficient manufacturing, a practically unlimited service life and a low maintenance demand.

Energy Accumulator, Storage, Flywheel, Braking Energy

1. Die Nutzung der Bremsenergie in Straßenbahnnetzen

Die Einsparung von Energie ist eine wichtige Aufgabe bei der Entwicklung neuer Anlagen und Maschinen. In der Antriebstechnik stellt sich damit die Frage nach der Nutzung der Bremsenergie von bewegten Teilen.

Frühzeitig wurde diese Frage beim Antrieb der Straßenbahnen untersucht. Inzwischen hat sich die Nutzung der Bremsenergie bei den Straßenbahnen seit mehreren Jahren durchgesetzt.

Bild 1: Energiespeicherwerk in Zwickau, Planitzer Straße mit einem Schwungradenergiespeicher

Eine Straßenbahn hat je nach Größe ein Gewicht von 30 bis 80 t und kann bei jedem Bremsprozess 1 bis 2 kWh in das Gleichspannungsnetz der Bahn zurückspeisen,

wenn zur gleichen Zeit ein Verbraucher diese Energie aufnehmen kann. Große Bahnnetze, wie zum Beispiel Leipzig oder Berlin werden deshalb mit über weite Strecken parallel zu Oberleitung verlaufenden Kabeln verstärkt, so dass sich Energieabnahme und Energierückspeisung über größere Entfernungen ausgleichen können. Dabei werden dann Einsparwerte von 20% des Energieverbrauchs erreicht.

Sofern weniger Straßenbahnen gleichzeitig unterwegs sind, ist eine Zwischenspeicherung der Bremsenergie sinnvoll, um die rückgespeiste Energie voll auszunutzen. Diese Speicherung stellt sehr hohe Anforderungen an den Speicher, da in Abständen von Sekunden ständig sehr großen Strömen aufgenommen und abgegeben werden müssen. Zur Zeit gibt es nur drei Systeme, die dazu in der Lage sind. Das ist ein Kondensatorspeicher von Siemens, ein Stahlschwungrad der Firma Piller und seit kurzem auch ein Faserverbundschwungrad der rosseta Technik GmbH.

Seit 2007 arbeitet ein solches Energiespeicherwerk im Netz der Städtischen Verkehrsbetriebe Zwickau. Dabei wurde erstmalig ein neuartiger Speicher mit einem Kohlenstofffaser-Schwungrad eingesetzt. Dieses System hat außergewöhnliche Eigenschaften. Das Schwungrad ist 165 kg schwer, kann sich bis zu 25.000 mal pro Minute drehen. Es hat einen Durchmesser von 700 mm und speichert 6 kWh. Das Schwungrad läuft im Vakuum doppelt elastisch gelagert. Es benötigt keine speziellen Fundamente und erzeugt nahezu keine Geräusche. Das Energiespeicherwerk ist im Wohngebiet aufgebaut und erfüllt die entsprechenden Normen.

Besonders erfreulich ist die zuverlässige Funktion des Systems. Die Konstruktion wurde so ausgeführt, dass ein völlig sicherer Betrieb bei geringstem Wartungsaufwand und einer sehr großen Lebensdauer gewährleistet ist.
Nach einigen Kinderkrankheiten in den ersten Monaten nach der Inbetriebnahme läuft der Speicher ununterbrochen im Dauerbetrieb. Abbildung 1 zeigt das Energiespeicherwerk in Zwickau im Januar 2009 in Funktion.

Der Energiespeicher kann Ströme bis 1000 A aufnehmen oder abgeben und hat dazu einen Motorgenerator mit einer aktiven Länge von nur 300 mm. Der Rotor besteht aus Permanentmagneten, die mit einer neuartigen Technologie ebenfalls mit Kohlenstofffasern bandagiert werden. Diese Technologie, die ursprünglich für den Schwungradspeicher entwickelt wurde, hat inzwischen viele Anwendung bei Hochleistungsmotoren gefunden. Die rosseta Technik GmbH hat diese Technologie erfolgreich weiterentwickelt. Es gelang, äußerst leistungsfähige Bandagen zu erzeugen, die ihre Festigkeit bis zu einer Temperatur von 230 ℃ behalten.

2. Die Nutzung der Bremsenergie beim Absenken von Lasten

Auch in Industrieanlagen gibt es viele bewegte Teile, die beschleunigt und abgebremst werden müssen. Um die Anlagen energieeffizienter zu machen, lohnt es sich, die verfügbare Bremsenergie zu untersuchen.
Kräne und Hochregallager, Roboter, Pressen und Stanzen haben Bremsenergie, die nutzbar gemacht werden kann.

In Abbildung 2 ist der typische Energiebedarfsverlauf eines Hafenkrans dargestellt. Ungefähr alle 75 s wird ein Container der Masse 30 t um 15 m gebremst abgesenkt.

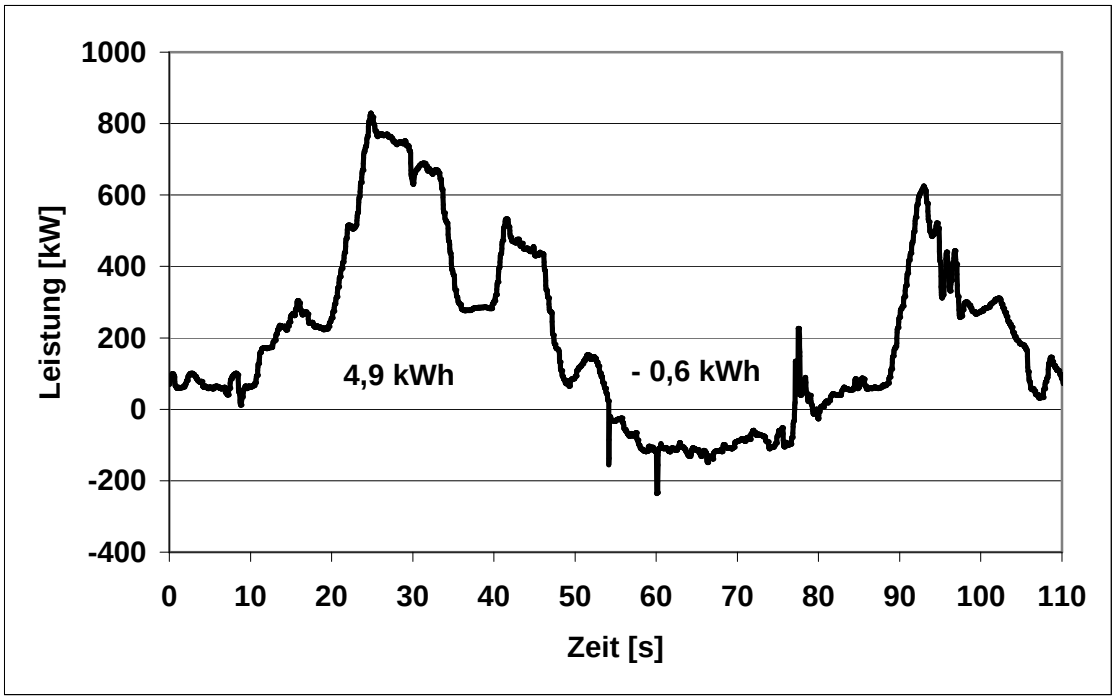


Bild 2: Leistungsaufnahme eines Hafenkrans

Daraus berechnet sich die mögliche Energie-Einsparung bei Nutzung der Bremsenergie entsprechend der Formel:

$$E = m \times h \times 9{,}81 \times \eta 1 \times \eta 2 \times t2 \times t3 / (1000 \times t1)$$

Formelzeichen	Bedeutung	Beispiel: Containerkran
E	Energie-Einsparung pro Jahr in kWh	81.889
m	Masse der abzusenkenden Last in kg	30.000
h	Weg des Absenkens in m	15
η1	Wirkungsgrad der Bremsenergie-Erzeugung	0,5
η2	Wirkungsgrad der Energiespeicherung und -rückspeisung	0,75
t1	Durchschnittlicher Abstand zwischen zwei Absenkvorgängen in s	75
t2	Arbeitsstunden pro Tag	14
t3	Arbeitstage pro Jahr	265

Tabelle 1: Formel der Berechnung der Energie-Einsparung für das Absenken von Lasten

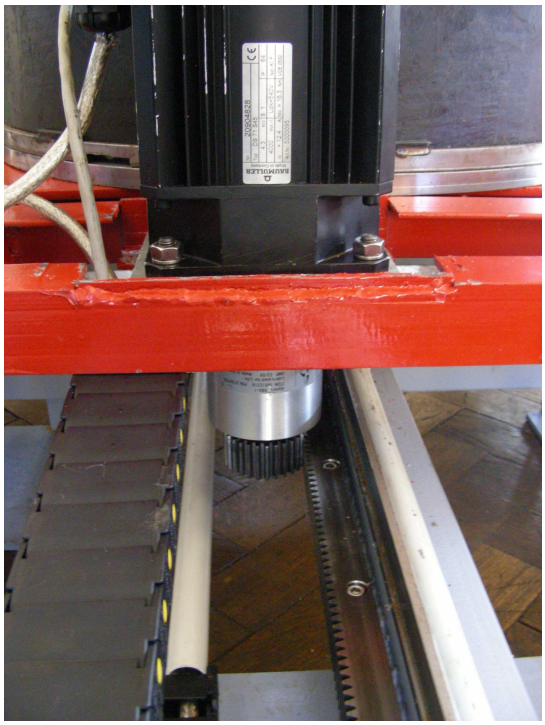
Die Energie-Einsparung im Beispiel Containerkran beträgt pro Jahr etwa 80.000 kWh und damit ungefähr 10 % des gesamten Energieverbrauchs des Containerkrans, der neben dem Heben und Senken auch noch für Drehen und Fahren aufgewendet werden muss. Diese Formel ist ebenso für die Berechnung der Energie-Einsparung bei Aufzügen oder Hochregalen anwendbar. In Abbildung 3 ist der Hafenkran aus dem Beispiel im Foto zu sehen.
Da die benötigte Energie mit einem Dieselmotor und einem Generator erzeugt wird, besteht die beste Lösung darin, für die Nutzung der Bremsenergie einen

Schwungradspeicher einzusetzen. Gegenüber der Nutzung von Kondensatoren ist der Platzbedarf und der Wartungsaufwand geringer.

Bei dem Schwungradspeicher für den Einsatz im Straßenbahnnetz oder in Kränen handelt es sich um ein komplexes System, das neben dem eigentlichen Schwungrad mit Motor und Vakuumgehäuse als Zusatzaggregate ein Vakuumsystem, einen Ölkreislauf und einem Wasserkreislauf hat. Weiterhin sind eine SPS zur Überwachung der Sensoren und zu Betriebsführung nötig. Der Speicher hat eine Größe von 1 x 1 x 1,2 m und lässt sich einfach transportieren.
Sein besonderer Vorteil ist jedoch der geringe Wartungsaufwand (nur ein Ölwechsel pro Jahr) und seine hohe Lebensdauer.

Bild 3: Hafenkran mit eigener Energieversorgung

3. Die Nutzung der Bremsenergie beim schnell bewegten Massen



In Robotern, Pressen, Stanzen und anderen Automaten müssen oft schwere Anlagenteile ständig hin- und her bewegt werden. Zur Untersuchung der dabei auftretenden Probleme wurde eine einfache Lineareinheit mit einem 900 kg schwerem Schlitten aufgebaut, der auf Rollen über 2 m bewegt werden kann. Der Antrieb erfolgt mit einen Synchronmotor am Schlitten, der auf eine Zahnstange am Grundgestell wirkt.

In der Abbildung 4 ist der Motor mit Getriebe und Ritzel zu sehen, das in die Zahnstange eingreift. Die Stromzuführung wird über eine Schleppkette realisiert, die im Bild links erkennbar ist.

Bild 4: Motor und Zahnstange der Lineareinheit

Bei den Versuchen erfolgte die Messung der Position, der Geschwindigkeit, des Motorstroms, der Motorspannung und der Zwischenkreisspannung.

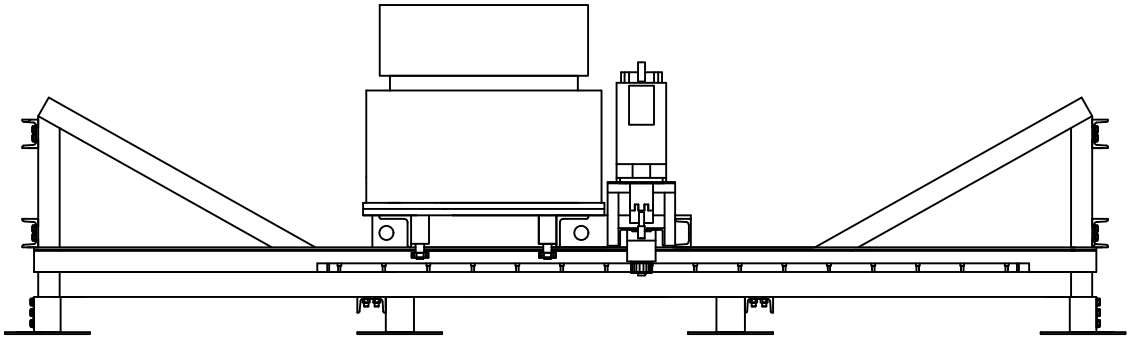


Bild 5: Lineareinheit, schematische Seitenansicht

Der verwendete Motor hat ein Drehmoment von 10 Nm und eine Übersetzung von 5:1. Der Schlitten wird pro Umdrehung des Ritzels um 176 mm bewegt. Die Leistungsaufnahme bei einer Fahrt mit Beschleunigen und Abbremsen ist in der Abbildung 6 dargestellt.

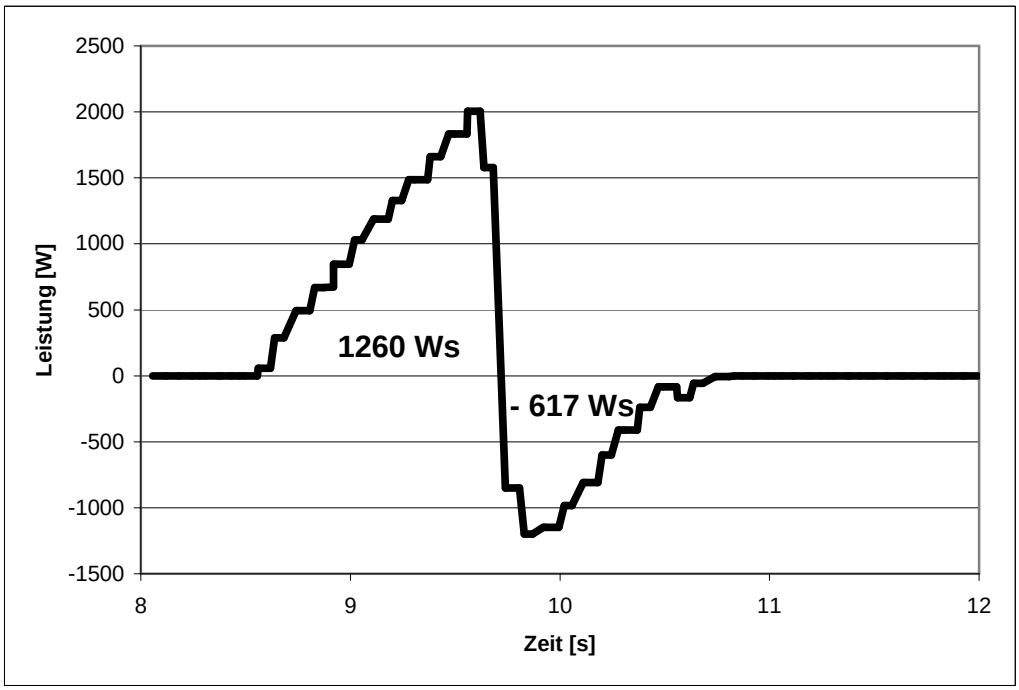


Bild 6: Leistungsaufnahme für eine Bewegung über 1800 mm mit Beschleunigen und Bremsen

Die Leistungswerte sind im Vergleich zum Heben und Senken von schweren Massen wesentlich geringer.
Aus den gewonnenen Messwerten wurde der Wirkungsgrad für die Beschleunigung zu 71 % und für das Abbremsen zu 68 % bestimmt. Damit kann auch hier eine einfach zu gebrauchende Formel zur Berechnung der Energie-Einsparung bei Nutzung der Bremsenergie entwickelt werden.

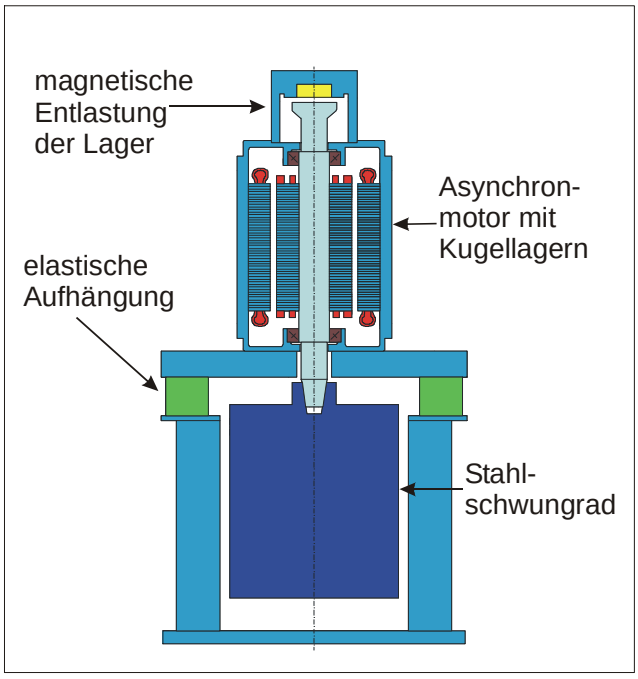
$$E1 = \eta1 \times \eta2 \times \eta3 \times M \times ü \times l \times 3{,}14 \times t2 \times t3 / (u \times t1)$$

Formelzeichen	Bedeutung	Beispiel: Lineareinheit
E1	Energie-Einsparung pro Jahr in kWh	1.629
M	Moment des Motors in Nm	12
η1	Wirkungsgrad Motor	0,73
η2	Wirkungsgrad der Bremsenergie-Erzeugung	0,61
η3	Wirkungsgrad der Energiespeicherung und -rückspeisung	0,74
ü	Übersetzungsverhältnis	5
l	Gesamte Wegstrecke in m	1,8
u	Weg des Schlittens bei einer Umdrehung des Ritzels in mm	176
t1	Durchschnittlicher Abstand zwischen zwei Bewegungen in s	3
t2	Arbeitsstunden pro Tag	22
t3	Arbeitstage pro Jahr	350

Tabelle 2: Formel der Berechnung der Energie-Einsparung eine Lineareinheit

Bei der Ermittlung der Formel wurde davon ausgegangen, dass der Schlitten bis zur halben Wegstrecke mit dem angegebenen Moment des Motors beschleunigt wird und danach sofort abgebremst wird. Ein Bereich, in dem der Schlitten mit konstanter Geschwindigkeit fährt, ist nicht vorgesehen. Obwohl die Leistung klein ist, entsteht durch die schnelle ständig wiederholte Bewegung eine nennenswerte Menge Bremsenergie. Durch deren Nutzung können etwa 20 % der Energie für die Schlittenbewegung eingespart werden.

4. Energiespeicher für kleine Leistungen



Um auch Energien effektiv speichern zu können, die mit geringen Leistungen anfallen, wurde ein neuartiger Schwungradspeicher entwickelt. Dabei wurden zwei Aufgaben gestellt.
Der Speicher sollte kostengünstig gefertigt werden können und gleichzeitig die Vorteile des großen Schwungradspeichers, das heißt zuverlässige Funktion, keine Schwingungen, lange Lebensdauer und minimaler Wartungsaufwand aufweisen.
Die gefundene Lösung ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt.

Bild 7: Schematische Darstellung des Energiespeichers Typ T3

In Abbildung 8 ist ein Foto des entwickelten Speichers für Leistungen bis 3 kW zu sehen.

Die Kühlung erfolgt durch einen Ventilator oberhalb des Motors. Durch die Benutzung der in großen Schwungrad bereits erfolgreich erprobten magnetischen Entlastung können die Lager des Motors trotz des großen Gewichtes des Stahlschwungrads benutzt werden. Da das Stahlschwungrad an Luft mit 3000 bis 6000 U/min läuft, findet ein Serienmotor Verwendung.
Um eine Lebensdauer von 10 Jahren ohne Wartung zu erreichen, wurde ein kleiner Ölkreislauf zur Schmierung der beiden Lager eingebaut. Die elastische Aufhängung des Motors mit dem festverbundenen Schwungrad sorgt für eine sehr gute Laufruhe und geringe Reibungsverluste in den Kungellagern. Die Leistungs-elektronik zum Betreiben des Systems am Zwischenkreis ist direkt am Grundrahmen befestigt.

Da das System normaler Weise in einen Schaltschrank eingebaut wird, ist kein Gehäuse vorgesehen.

Bild 8: Ansicht des Energiespeichers Typ T3

Der hier gezeigte Speicher hat seine Dauererprobung ausgezeichnet bestanden und wird bereits in Serie gefertigt. Da Bedarf an solchen Speichern auch für mittlere Leistungen besteht, wurde weitere Systeme nach dem selben Konstruktionsprinzip für Leistungen von 5 kW, 10 kW und 15 kW geschaffen. Der Gesamtwirkungsgrad des Energiespeichers vom Aufladen bis zum Rückspeisen beträgt 70 %. Das Schwungrad ist so dimensioniert, dass die Nennleistung für 7 bis 14 Sekunden aufgenommen und abgegeben werden kann.

Beim Einsatz von Schwungradspeichern ergibt sich neben der Einsparung der Bremsenergie die Stabilisierung des Zwischenkreises auch bei kurzzeitigen Netzausfällen als weiterer wesentlicher Vorteil.

Wir hoffen, dass in Zukunft Schwungradspeicher an vielen Stellen zum Einsatz kommen und stärker als bisher zur Einsparung von Energie beitragen werden.