

Moderne Schwungmassenspeicher – eine alte Technik in neuem Aufschwung

Dr. sc.tech. **Peter von Burg**, Zürich

Zusammenfassung

Schwungräder als Energiespeicher sind eine alte Anwendung in der Technik. Mit den Eigenschaften der heute erhältlichen faserverstärkten Kunststoffen können aber neuerdings Schwungradspeicher mit wesentlich höheren Leistungen bei kleinerem Gewicht und kompakter Baugrösse realisiert werden. Gleichzeitig lässt sich das Berstverhalten mit diesen Materialien wesentlich gutmütiger gestalten. Die Vorteile der kinetischen Speicher, hohe Leistungen mit grosser Zyklenzahl aufnehmen und abgeben zu können, hebt sie gegen die heute bekannten Batterien deutlich ab.

Als ideales Anwendungsgebiet sind neben dem Fahrzeugbereich vor allem die schwachen Netzversorgungen mit hohen fluktuierenden Spitzenleistungen anzusehen. In der Energieversorgung von Bahnen, bei der Einspeisung von dezentral erzeugter Energie in ein Netz oder der aktiven Netzfilterung können Kurzzeit-Speicher sinnvoll eingesetzt werden.

Weiteres Entwicklungspotential liegt sowohl in den für das Schwungrad verwendeten Materialien, bei der Lagerung wie auch in der Elektrotechnik.

Einleitung

Die Speicherung von Energie ist schon seit die Menschheit die Technik nutzt ein zentrales Anliegen. Bereits in der Antike wurden Räder mit grossem Massenträgheitsmoment als Spinnräder oder Töpferscheiben verwendet. Seit der industriellen Revolution konnte auf das Schwungrad bei Dampfmaschinen, ersten Werkzeugantrieben und den aufkommenden Verbrennungsmotoren nicht mehr verzichtet werden. Später wurden Torpedos, Stadtbusse,

Lokomotiven und Untergrundbahnen mit Kreiseln als der einzigen Energiequelle angetrieben.



Bild 1: Gyro-Lokomotive Maschinenfabrik Oerlikon 1955 (Grubenlokomotive)

In der modernen Technik kamen Schwungräder zuerst wieder in der Raumfahrt bei der Lageregelung und zur Überbrückung der Energieversorgung im Erdschatten zur Anwendung. Mit dem Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen konnte nun eine wesentlich höhere Energiedichte als früher erreicht werden. Die im Vergleich zu chemischen Speichern beliebige Anzahl Lade- und Entladezyklen und damit die sehr grosse erreichbare Lebensdauer war ausschlaggebend für die Wiederentdeckung der Schwungräder.

Ein Vergleich eines Speichers mit Stahlrotor wie er vor 40 Jahren bei Grubenlokomotiven eingesetzt wurde [1] und einem modernen Speicher [2] zeigt Tabelle 1.

Speicher	Baujahr	Drehzahl [U/min]	Energieinhalt [kWh]	Masse Schwungrad [kg]	Masse Speicher [kg]
MFO EG 120-17	1955	3'000	5,6	1530	3500
ETH KIS NEFF525	1995	15'000	1,5	58	280

Tabelle 1: Technische Daten Schwungradspeicher früher und heute

Der markante Fortschritt der modernen Schwungradtechnologie ermöglicht heute neue Anwendungen, die vor kurzem noch nicht denkbar gewesen sind. Neue Hybridantriebe vom kleinen PW über den Stadtbus zur Lokomotive sind in verschiedenen Ländern in der Markteinführung oder in Entwicklung. Stationäre Speicher für Netzfilterung und Spannungs-

stabilisierung, zur Abdeckung von Leistungsspitzen und gegen kurze Versorgungsunterbrüche sind ebenso verschiedentlich in Entwicklung oder bereits in Betrieb.

Moderne kinetische Energie-Speicher

Moderne Schwungradspeicher zeichnen sich vor allem durch die erreichte Umfangsgeschwindigkeit beim Rotor aus. Geschwindigkeiten von 1000 m/s werden heute regelmässig erreicht, mit neuen, noch besseren Materialien wird die 2000 m/s Marke bald einmal fallen. Dass solche Rotoren nur noch im abgeschlossenen Gehäuse und unter Vakuum drehen können, liegt auf der Hand. Die Energie kann bei diesen Drehzahlen ausschliesslich über einen am Schwungrad angekoppelten elektrischen Motor/Generator entnommen bzw. eingespiessen werden. Eine direkte mechanische Kopplung über ein Getriebe macht wenig Sinn.

Am Beispiel des an der Eidgenössisch Technischen Hochschule Zürich entwickelten Schwungradspeichers [Bild 2] sind einige dieser technischen Errungenschaften deutlich ersichtlich [2].



Bild 2: 250 kW / 1.5 kWh Schwungradsystem

So wurde das Schwungrad aus glas- und kohlefaserverstärktem Kunststoff aufgebaut. Die Dimensionierung, die Materialwahl und das Herstellungsverfahren wurden von Anfang auf ein gutmütiges Berstverhalten hin ausgelegt. Der ganze Rotor dreht im Vakuum. Die

permanenterregte elektrische Maschine weist nur sehr wenig Statorerisen auf und ist auf eine minimale Verlustleistung bei hoher Drehzahl optimiert. Die Leistungselektronik wurde mittels zwei versetzt getakteten Wechselrichtern für eine Maschine mit offenen Wicklungen konzipiert. Damit können auch bei grossen Leistungen und Frequenzen die Verluste minimal gehalten werden. Eine aktive Magnetlagerung schliesslich ermöglicht eine reibungs- und abnützungsfreie Lagerung bei hohen Drehzahlen und unter Vakuum.

Fortschritt in der Materialeigenschaften

Der grösste Unterschied zu den früheren kinetischen Speichern besteht im Einsatz moderner Kunststoffe für den Schwungradrotor. Wenn früher hochlegierte Stähle oder sogar Titan eingesetzt wurden, werden bei modernen Schwungrädern faserverstärkte Kunststoffe verwendet. Vorteile sowohl in der erzielbaren Energiedichte aber auch im Berstverhalten machen diese Werkstoffe ideal zur Speicherung kinetischer Energie. Durch die kleinere Rotormasse bei höherer Energiedichte wird auch die Lagerung weniger beansprucht und erzeugt dabei kleinere Verluste. Als einziger Nachteil sind die grösseren Drehzahlen zu erwähnen. Durch die grossen Fortschritte in der Wechselrichter-Technologie fällt dieser Nachteil aber immer weniger ins Gewicht.

Energiedichte

In Tabelle 2 sind die Eigenschaften verschiedener Materialien aufgelistet. Für die Verwendung in einem Schwungrad sind vor allem die Festigkeit bezogen auf die Dichte massgebend. Daraus kann eine maximal mögliche Umfangsgeschwindigkeit und die entsprechende Energiedichte eines ringförmigen Rotors abgeleitet werden.

Material	Zugfestigkeit [MPa]	Dichte [kg/m ³]	spez. Festigkeit [kNm/kg]	max. Umfangs- geschwindigkeit [m/s]	mögliche Energiedichte [kJ/kg]
Stahl	1300	7800	167	410	106
Titan	1150	5100	225	570	143
GFK	1300	1900	680	820	335
CFK	6300	1546	2470	1570	1'570

Tabelle 2: Eigenschaften moderner Materialien

Deutlich sind die sehr grossen Unterschiede zwischen den metallischen Rotoren und den Rotoren aus faserverstärkten Kunststoffen ersichtlich. Trotz der kleineren Dichte kann dank

der höheren spezifischen Festigkeit der Kunststoffe mehr Energie bei gleicher Masse gespeichert werden.

Berstverhalten

Dass das Berstverhalten von Rotoren mit Energien, die den ganzen Speicher mehrere tausend Meter in die Luft heben könnten, als wesentlicher Faktor in die Auslegung einfließen muss, dürfte nicht erst bei den heute im Betrieb erreichbaren Umfangsgeschwindigkeiten von 500 m/s und mehr erstaunen. Da man nicht zwingend von einem fehlerfreien Rotor ausgehen kann und auch eine Prüfung mit Überdrehzahl keine Garantie über die gesamte Lebensdauer ergibt, muss man bei jedem Rotor mit einem Berstfall rechnen können. Welche Schutzvorrichtungen bei Rotoren aus Stahl notwendig sind weiss man mit genügender Erfahrung aus dem Turbinenbau. Wenn solche Schutzvorrichtungen fehlen, muss durch regelmässige Inspektion und Überwachung ein beginnender Schaden mit Garantie so frühzeitig entdeckt werden können, dass er nicht zu einem Versagen des Rotors führen kann.

Die Unterschiede eines geborstenen Rotors aus einem metallischen Material im Vergleich zu einem Rotor aus faserverstärktem Kunststoff sind sehr deutlich [Bild 3].



Bild 3: Bruchstücke von geborstenen Rotoren

Der Rotor aus Metall zerlegt sich in einzelne, sehr grosse Bruchstücke, die mit hoher Geschwindigkeit und Energie auf die Gehäusewand auftreffen. Ein Kunststoffrotor kann so dimensioniert werden, dass eine riesige Zahl kleinster Teilchen mit relativ kleiner Energie über dem ganzen Gehäuseraum verteilt auftritt. Das Schutzgehäuse wird auf diese Weise sehr gleichmässig und nicht mehr nur punktuell beansprucht. Entsprechend müssen die Schutzmassnahmen wesentlich weniger massiv ausgebildet sein. Allerdings zeigen nicht alle Kunststoffrotoren in jedem Fall ein gutmütiges Berstverhalten, andere Bruchmechanismen sind je nach Rotordesign auch denkbar.

Neben dem Berstverhalten des Rotors müssen auf in jedem Fall mit einer umfassenden Risikoanalyse die Sicherheit des ganzen Systems nachgewiesen und die vorgesehenen Massnahmen etwa bei einem Versagen der Lagerung oder bei Vakuumbuch auf ihre Wirkung überprüft werden.

Weitere technische Entwicklung

Die faserverstärkten Kunststoffe werden immer noch laufend weiterentwickelt. Sowohl die Materialeigenschaften wie auch die Materialkosten konnten in den letzten Jahren laufend verbessert werden. Die Preisentwicklung einer üblichen Kohlefaser in den letzten Jahren [Bild 4] zeigt diese Tendenz sehr deutlich. Ein Ende dieser Entwicklung ist noch nicht absehbar.

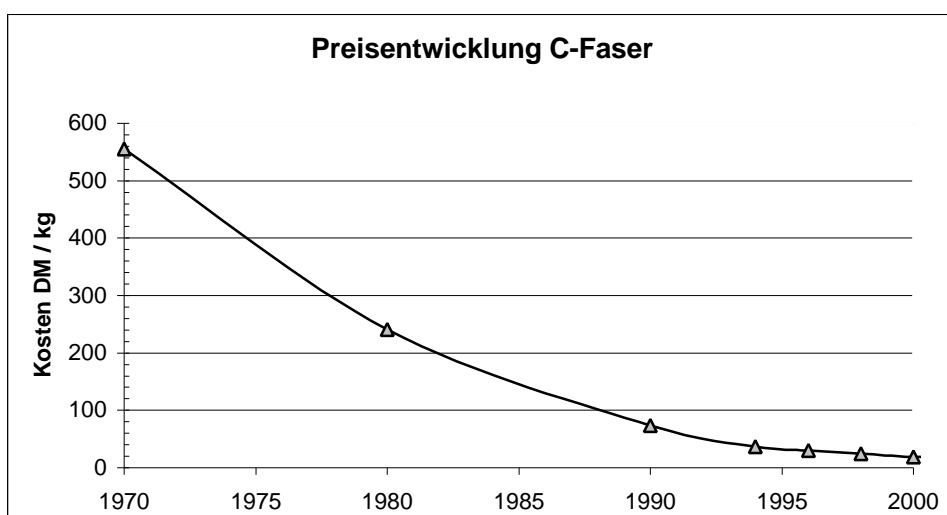


Bild 4: Preisentwicklung C-Faser

Ebenso sind durch die Optimierung der Herstellverfahren die Festigkeit der Fasern stetig gesteigert werden. Heute auf dem Markt erhältliche Fasern haben eine doppelt so hohe Festigkeit gegenüber den Produkte, die vor einigen Jahren verkauft wurden.

In der weiteren Zukunft werden neue Technologien wie etwa supraleitende passive oder kostengünstige aktive Magnetlager die reibungs- und abnützungsfreie Lagerung von Rotoren mit noch höheren Drehzahlen ermöglichen [3] [4]. Aber auch die konventionellen Wälzlager sind noch lange nicht am Ende der Entwicklung angelangt. Mit keramischen Kugeln, neuen Beschichtungen der Laufflächen und Verbesserungen bei der Schmierung sind heute hochtourige Lagerungen mit grossen Standzeiten machbar, die bis vor kurzem als undenkbar galten.

Die grossen Fortschritte in der Leistungselektronik ermöglichen eine Verwendung von hochtourigen drehzahlvariablen Antrieben grosser Leistung. Die Entwicklung neuer noch leistungsfähigerer Schaltelemente (GTO, IGBT) in der Leistungselektronik ermöglicht den Bau von Wechselrichtern mit immer grösseren Leistungen bei hohen Drehzahlen. So waren Wechselrichter im Megawattbereich für Antriebe mit Drehzahlen von 18'000 U/min bis vor kurzem nur mit kleinem Wirkungsgrad machbar.

Auch die elektrischen Maschinen bergen noch grosses Entwicklungspotential. Hochtourige Motoren mit grosser Leistung sind einerseits durch die Festigkeit verwendeten Materialien begrenzt. Die verwendeten Motorenbleche wie auch die Permanentmagnete wurden laufend besser. Neue Motorenkonzepte reduzieren die Verlustleistung sowohl unter Last wie auch im Leerlauf. Mit verbesserten Berechnungsmethoden und den gewonnenen Erfahrungen lassen sich die Maschinen zudem optimaler auslegen und werden damit auch wesentlich kompakter [5].

Vergleich mit anderen Speichertechnologien

Bevor man einen Vergleich verschiedener Technologien zur Energiespeicherung beginnen kann, muss man sich über die zu beurteilenden Charakteristiken klar werden. Als wichtigstes Unterscheidungskriterium kann das Verhältnis von Energieinhalt zu abgegebener bzw. aufgenommener Leistung des Speichers angesehen werden. Dieses Verhältnis beschreibt nichts anderes als die Zeit, in welcher der Speicher entleert, bzw. aufgeladen werden kann. Als zweite charakteristische Grösse kann die Häufigkeit der Lade- und Entladezyklen verwendet werden.

Kinetische Speicher werden meistens mit einem Energie zu Leistungsverhältnis von Sekunden bis wenigen Minuten eingesetzt. Ein Projekt in den USA [6] sieht allerdings ein ausschliesslich mit mehreren Schwungräder angetriebenes Auto mit einer Reichweite von 500 km vor, was einer Entladezeit von mehreren Stunden entspricht.

Die typischen Vergleichszahlen verschiedener Energiespeicher sind in Tabelle 3 ersichtlich. Es ist klar ersichtlich, dass die kinetische Speichertechnologie ihre Vorteile bei hohen Leistungen und einer grossen Zahl von Lastzyklen bei vergleichsweise kleiner umgesetzter Energie hat. Der Schwungrad-Speicher liegt in seiner Charakteristik also zwischen dem Kondensator und der Batterie und damit etwa in derselben Region wie die Speicher mit supraleitenden Spulen SMES.

Speichertechnologie	Energiedichte [Wh/kg]	Leistungsdichte [W/kg]	Energie / Leistung [sec]	Zyklenzahl Lebensdauer [-]	Wirkungsgrad [%]
Schwungrad	5-50	180-1800	100	10 ⁶	90-95
Batterie	30-200	100-700	>1'000	1'000	80-85
Kondensator	2-5	7'000- 18'000	<1	>10 ⁶	>95
SMES	<1	1'000	10	10 ⁶	90

Tabelle 3: Vergleich Speichertechnologien

Weitere Bewertungskriterien sind etwa ein über die Drehzahl eindeutig messbarer Energieinhalt ohne Kapazitätseinbuße durch Alterung, keine mögliche Umweltbelastung durch Chemikalien, keine speziellen Anforderungen an den Standort, kein Einfluss von Klima oder Temperatur auf die Speichereigenschaften und eine sehr lange Lebensdauer. Auch sind Leistung und Charakteristik des Speichers beim Lade- wie beim Entladebetrieb identisch.

Anwendung

Die sinnvollen Anwendungen ergeben sich aus den vorher beschriebenen technischen Eigenschaften. Die hauptsächlichen Einsatzbereiche sind deshalb:

- Kurzzeitspeicher für Beschleunigungs- bzw. Bremsenergie bei Fahrzeugen
- Kurzzeit- bzw. Stand-by-Speicher bei Netzschwankungen und kurzen Unterbrüchen, Netzfilterung, Frequenz- und Spannungsregelung
- Kurzzeitspeicher zum Lastausgleich schwacher bzw. lokaler Netze, Reduktion der notwendigen Anschlussleistung, temporäre Netzverstärkung
- Bereitstellung von Energiereserven für kurze Leistungsspitzen, Einschalt- und Anfahrvorgänge

Mobile Anwendungen

Fahrzeuge sind von ihrem Anwendungsprofil her ideal für kurzzeitige Energiespeicher. Insbesondere im Nahverkehr folgen sich Beschleunigungs- und Bremszyklen in kurzer Folge. Die vom Fahrer gewünschte Dynamik ist aber nicht kostenlos, so beträgt bei einem PKW die installierte Leistung schnell einmal das zehnfache der benötigten mittleren

Leistung. Bei einem Hybridantrieb wird deshalb die benötigte mittlere Leistung durch einen klein dimensionierten Verbrennungsmotor geliefert und die kurzfristig gewünschte Beschleunigungsleistung aus einem unabhängigen Speicher genommen [7] [8]. Auch bei einem leitungsgebundenen elektrischen Fahrzeug kann ein zusätzlicher Energiespeicher die vom Netz zu liefernde Spitzenleistung drastisch reduzieren. Erste Trolleybusse mit einem Schwungrad als Zusatzspeicher sind auf dem Netz der Basler Verkehrsbetriebe seit einiger Zeit im Einsatz. Technische Grenzen sind vor allem durch die Lagerkräfte eines bewegten Kreisels, die sehr hohen Sicherheitsanforderungen und den notwendigen elektrischen Antrieb gegeben.

Stationäre Anwendungen

Im Netzverbund wirkt üblicherweise das ganze Netz als Ausgleich zwischen einem lokal fluktuierenden Leistungsbedarf und der zentralen Energieerzeugung. Ein Energiespeicher ist daher in den wenigsten Fällen notwendig. Die Tages- bzw. Saisonschwankungen des elektrischen Energiebedarfes sind so riesig, dass die hier diskutierten Speicher kaum zur Diskussion stehen. Spezielle Situationen wie während vielen Jahre die Energieversorgung von Berlin sind die Ausnahme.

Bei einer schwachen Netzstruktur, stark fluktuierenden Lasten oder nicht kontrollierbarer, dezentraler Energie-Einspeisung kann ein bestehendes Netz an seine Kapazitäts- und Stabilitätsgrenzen kommen. Eine stärkere Einbindung in das sehr stabile Hochspannungsnetz oder der Einsatz eines Energiespeichers kann in solchen Fällen notwendig sein.

Als ein typische Beispiel einer stark fluktuierenden Leistung kann man die Bahnstromversorgung ansehen. Bild 5 zeigt den Leistungsfluss eines Unterwerks der Schweizer Bundesbahnen SBB über den Zeitrahmen einer Stunde. Die für den Investitionsbedarf entscheidende Spitzenleistung übersteigt dabei die mittlere Leistung um den Faktor 3.

In einer Untersuchung [9] wurden die Kosten für die Energieversorgung dieses Netzes (Kabel bzw. Übertragungsleitung bzw. statischer Umformer, Unterwerk, Energie, Unterhalt) auf jährlich 6 bis 24 Mio DM beziffert. Es liegt auf der Hand, dass neben den konventionellen Lösungen auch die Variante mit Energiespeicherung untersucht worden ist. Dabei würde der Energiespeicher die Spitzenleistung nach Bedarf an das Netz abgeben, die dazu notwendige Bandenergie könnte über den bereits bestehenden Fahrdrabt in den Schwachlast-Perioden in den Speicher übertragen werden.

Wirkleistungsbedarf SBB Unterwerk

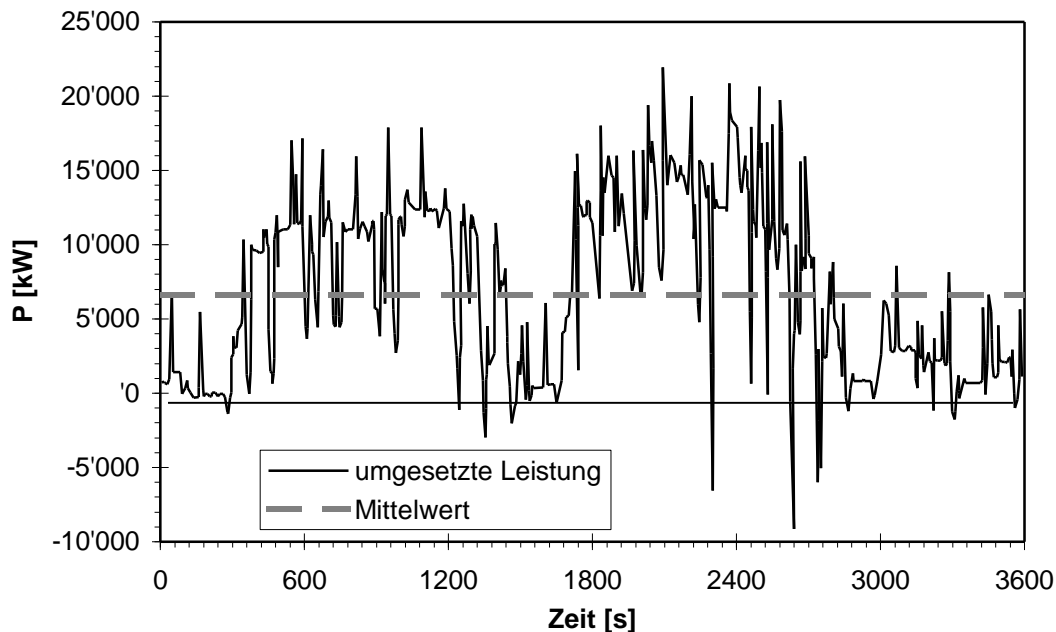


Bild 5: Leistungsfluss Bahnstromversorgung

Erste Abschätzungen zeigen, dass ein entsprechender Schwungradspeicher sowohl von der technischen als auch von der wirtschaftlichen Seite machbar sein müsste. Allerdings sind Speicher dieser Grösse bisher noch nirgends realisiert worden.

Eine zweite Anwendung von Schwungradspeichern im stationären Energieversorgungsnetz mit fluktuierender Energieproduktion wird in einem weiteren Vortrag an dieser Tagung „Schwungradenergiespeicherung für Windenergieproduktion – das europäische Projekt FlyWiP“, von C.A.M. van den Ende, vorgestellt [10].

Im Bereich der aktiven Netzfilterung wurde mit einem Schwungrad bereits erfolgreich nachgewiesen, dass Spannungseinbrüche dank einem Energiespeicher effektiv gefiltert werden können. Da die Zahl der Spannungseinbrüche je nach Netz sehr gross sein kann und die benötigte Energiemenge die Möglichkeiten von Kondensatoren übersteigt, kann ein Schwungradspeicher eine wirtschaftliche Lösung für dieses Problem darstellen.

Der in [11] vorgestellte Netzfilter soll in einem 1 MW Mittelspannungsnetz Spannungseinbrüche von 6 % und einer Dauer bis zu einer Sekunde mit einem kleinen 60 kW Energiespeicher [Bild 6] vollständig kompensieren. Eine konventionelle Lösung durch eine Verstärkung des Netzes würde wesentlich grössere Kosten verursachen.

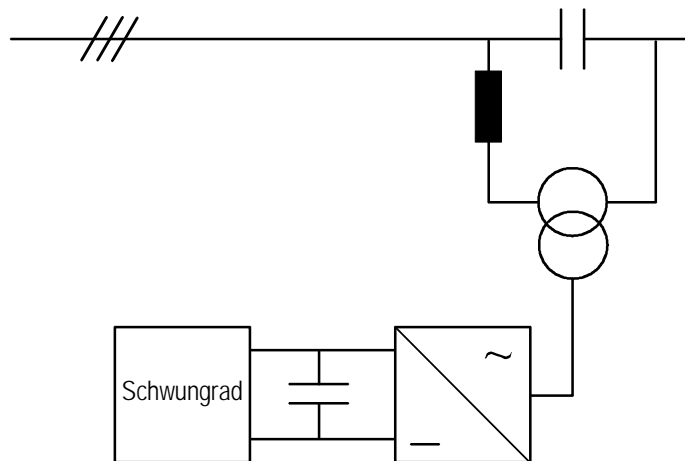


Bild 6: Aktiver Netzfilter

Nachdem erste Versuche mit diesem Netzfilter bereits erfolgversprechende Resultate ergeben hat, soll in den nächsten Monaten eine Pilotinstallation eine vertiefte Erprobung ermöglichen.

Weitere Entwicklung

Die weitere Entwicklung der kinetischen Energiespeicherung für stationäre Anwendungen wird in noch grössere Anlagen mit Einheitsgrössen von einigen MW gehen müssen. Durch eine Parallelschaltung solcher Anlagen können so Leistungen von einigen 10 bis 100 MW an das Netz abgegeben werden.

Die Speicherung so grosser Energiemengen, die im Versagensfall als mechanische Energie auch noch riesige Leistungen entwickeln können, verlangen nach den entsprechenden Sicherheitsmassnahmen.

Auf dem mobilen Anwendungsgebiet wird vor allem die Wirtschaftlichkeit über den Einsatz dieser umweltfreundlicheren, aber technisch aufwendigeren Lösung entscheiden.

Literatur

- [1] Die Elektrogyro-Lokomotive des Gonzenbergwerks, N. Lang, Verlag Pro Gonzenbergwerk, Sargans, Schweiz, 1994
- [2] Schlussbericht NEFF Projekt 525, P. von Burg, M. Ahrens, A. Colotti, P. Guggenbach, Kinetischer Kurzzeit-Energie-Speicher, Institut für Robotik, ETH Zürich, 1995

- [3] A Flywheel for Energy Storage with frictionless High Temperature Superconductor Bearings, H.J. Bornemann et. al. Proc. 4th Int. Symp. On Magnetic Bearings, Zürich 1994, pp 543-545
- [4] Ein Schwungrad-Energiespeicher mit permanentmagnetischer Lagerung, M. Kolk, Institut für Grenzflächenforschung und Vakuumphysik Jül-3470, Forschungszentrum Jülich, 1997
- [5] Optimised design of electrical machine with integrated flywheel, A. Colotti, K. Reichert, P. von Burg, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, Brussels, Belgium
- [6] Reinventing the Wheel, Will Hively, Discover Magazine August 1996
- [7] Energetisches Betriebsverhalten eines permanenterregten Drehmassenspeichers in Theorie und Praxis, G. Reiner, K. Reiner, VDI Bericht Nr. 1168, 1994
- [8] Development of an advanced high speed flywheel energy storage system, F.J.M. Thoolen, Thesis Eindhoven University of Technology, Holland, 1993
- [9] SMES-Projekt Abschlussbericht AH 92/55, Wirtschaftlichkeitsanalyse SMES, E. Halder, ABB/Bundesamt für Energiewirtschaft, ENET Bern Bericht 9020016-6, 1992
- [10] Schwungradenergiespeicherung für Windenergieproduktion – das europäische Projekt FlyWiP, C.A.M. van den Ende, KEMA NL, VDI Tagung „Energiespeicherung für elektrische Netze“, VDI Bericht 1404, 1998
- [11] Flywheel based power quality improvement in a medium voltage grid, P. von Burg, J. Allmelling, Electrical Energy Storage Systems, Applications & Technologies, EESAT 98, 1998