

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 91 (2000)

**Heft:** 11

**Artikel:** Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Schwungradspeicher

**Autor:** Täubner, Frank

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-855555>

### **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:** 08.02.2026

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

# Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Schwungradspeicher

Das geheimnisvolle Verhalten eines Kreisel faszinierte immer wieder Techniker und Ingenieure. Die Nutzung als Energiespeicher erfordert die Lösung schwieriger Probleme. Es werden Rotoren benutzt, die Zugbelastungen von 100 t auf 1 cm<sup>2</sup> aushalten und sich mit dreifacher Schallgeschwindigkeit im Vakuum drehen können.

Die Idee, Energie in einem schnell rotierenden Kreisel zu speichern, ist nicht neu. Leider liegt das erreichbare Speichervermögen eines Stahlschwungrades bei höchstens 15 Wh/kg und damit um den Faktor 2 schlechter im Vergleich zu herkömmlichen Bleibatterien. Daher kommen Metallschwungräder als leistungsfähiger Energiespeicher kaum in Frage.

Seit Anfang der 70er Jahre gibt es das Grafitfaser-Epoxidharz-Verbundmaterial mit einer ungefähr dreifach höheren Festigkeit im Vergleich zu Stahl. Das führte zu der grossen Hoffnung, mit Faserverbundschwungrädern einen universellen Speicher aufbauen zu können. Entsprechende Forschungsprogramme wurden damals in fast allen Industriestaaten begonnen und nach einigen Jahren ohne Erfolg beendet.

## Voraussetzungen

Durch eine leistungsfähige Rechen-technik nach der «Finite Element»-Methode (FEM) wurde es in den letzten Jahren möglich, die Schwungräder genau zu simulieren und so eine Vielzahl von Schleuderversuchen in kurzer Zeit «virtuell» am Rechner durchzuführen. Dadurch konnten die Materialeigenschaften in Hochleistungsrotoren wesentlich besser ausgenutzt werden, wie im ersten Teil des Beitrages zu sehen sein wird.

Eine zweite wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung der Schwungradspeicher ist die Verfügbarkeit von Wechselrichtern, die Synchronmotoren hoher Leistung und grosser Drehzahl an-

steuern können, um die Schwungräder zu beschleunigen oder beim Abbremsen deren mechanische Energie wieder in elektrische Leistung zurückzuverwandeln.

Die Ausführungen beruhen auf Forschungsarbeiten im Wissenschaftlich-Technischen Zentrum für Motoren- und Maschinenforschung Rosslau gGmbH (WTZ Rosslau) der letzten vier Jahre, wo im Rahmen eines vom Bundesministe-

rium für Wirtschaft geförderten Vorhabens drei unterschiedliche Schwungradkonstruktionen untersucht und verschiedene Prototypen von Speichern aufgebaut und erprobt wurden. Zurzeit wird die Fertigung von Schwungradspeichersystemen vorbereitet.

## Das Faserverbundschwungrad

Man kann sich leicht einen dünnen Ring aus in tangentialer Richtung gewickeltem Faserverbundmaterial vorstellen, der im Vakuum um seine Achse rotiert. Dabei werden die tangentialen Kräfte von den Fasern aufgenommen, und ein Energiespeichervermögen von 120 bis 170 Wh/kg liegt vor.

Sobald man vom Ring zu einer Scheibe übergeht, wachsen die Spannungen in radialer Richtung stark an. In der

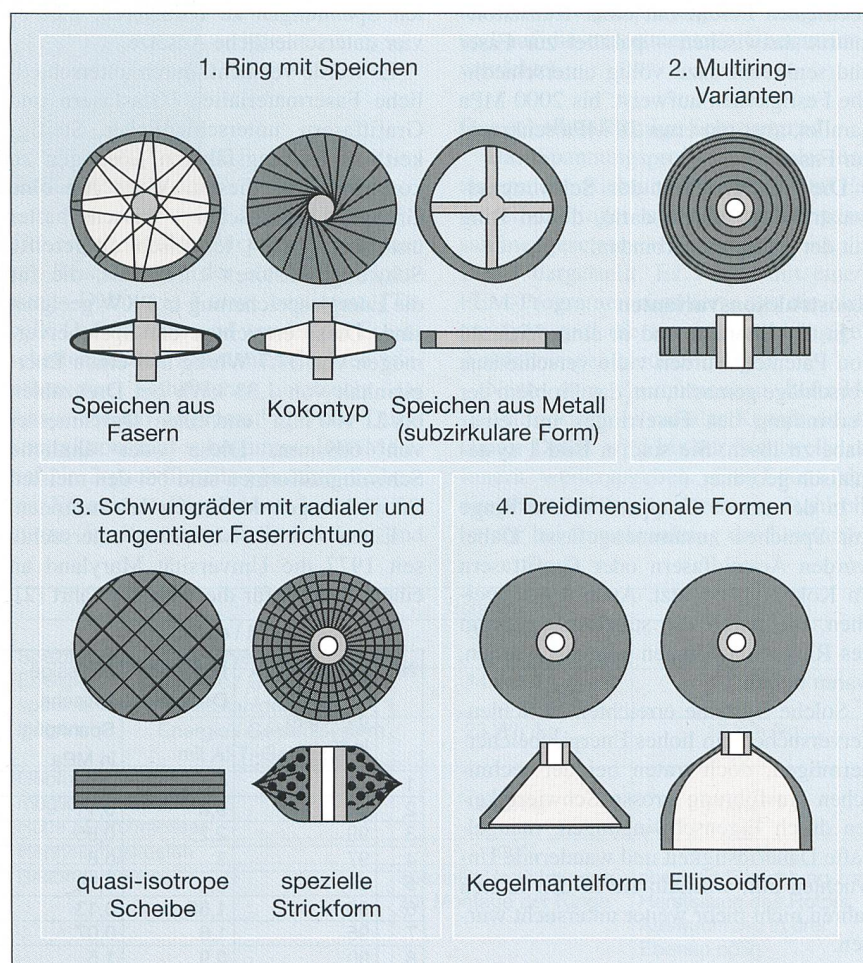
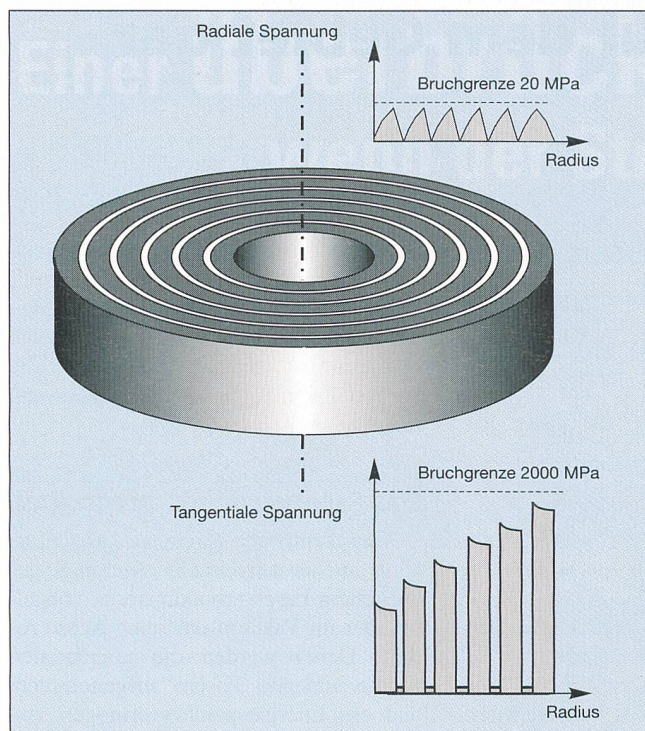


Bild 1 Konstruktionsvarianten für Faserverbundschwungräder

### Adresse des Autors

Dr. rer. nat. Frank Täubner, Wissenschaftlich-Technisches Zentrum für Motoren- und Maschinenforschung Rosslau gGmbH  
D-06862 Rosslau, info@wtz.de





**Bild 2** Schematischer Aufbau des Elastomer-Multiring-Schwungrades

Scheibe entstehen Risse, sie zerteilt sich in einzelne Ringe weit unterhalb deren Zerreissdrehzahl, weil Faserverbundmaterial – bedingt durch den Aufbau aus hochfesten Fasern mit einer Kunststoffmatrix dazwischen – parallel zur Faser und senkrecht dazu völlig unterschiedliche Festigkeiten aufweist: bis 2000 MPa parallel, aber nur etwa 20 MPa senkrecht zur Faser.

Die Schwierigkeit der Schwungradkonstruktion besteht darin, diesen Ring mit der Achse zu verbinden.

## Konstruktionsvarianten

In der Literatur und in einer Vielzahl von Patenten wurden viele verschiedene Vorschläge gemacht, um das Problem der Verbindung des Faserringes mit einer Nabe zu lösen. Sie sind in Bild 1 systematisch geordnet.

In der ersten Gruppe sind die Ringe mit Speichen zusammengefasst. Dabei wurden Aramidfasern oder Graphitfasern im Kokontyp benutzt. Auch Metallspeichen, die durch die subzirkuläre Form des Ringes nach innen gepresst wurden, waren üblich.

Solche Systeme erreichten in Schleuderversuchen ein hohes Energiespeichervermögen, doch traten bei der technischen Ausführung grosse Schwierigkeiten durch Eigenschwingungen, mangelhafte Dauerfestigkeit und wandernde Unwuchten auf, weshalb sie in den letzten Jahren nicht mehr weiter untersucht wurden.

Eine zweite oft untersuchte Variante sind die Multiring-Formen. Nach Bild 1

wird ein Satz Ringe mit wachsenden Durchmessern hergestellt und zu einem scheibenförmigen Schwungrad zusammengebaut. Um die Höhe der radialen Spannungen zu reduzieren, gibt es vier unterschiedliche Ansätze.

Es wurde versucht, durch unterschiedliche Fasermaterialien (Glasfasern und Graphitfasern unterschiedlicher Steifigkeit) zu leistungsfähigen Lösungen zu kommen. Auf diesem Wege hat eine Gruppe kanadischer Wissenschaftler um Flanagan [1] technisch ausgereifte Schwungradrotoren entwickelt, die für die Energiespeicherung in PKW geeignet sind. Diese erreichten ein Speichervermögen von 37,7 Wh/kg und einen Energieinhalt von 1,33 kWh bei Drehzahlen bis 21 900 min<sup>-1</sup> und einem Durchmesser von 609 mm. Diese oder ähnliche Schwungradformen sind bei den meisten Entwicklungen der letzten Zeit zu finden.

Einen zweiten Vorschlag untersuchte seit 1977 die Universität Maryland an einem System für die Weltraumfahrt [2].

Die Ringe wurden so montiert, dass eine Vorpresse in radialer Richtung entsteht, die den radialen Zugspannungen entgegenwirkt. Die Ringe müssen in ihren Abmessungen sehr genau gefertigt sein. Durch die definierte Überlappung des Innendurchmessers des äusseren Ringes mit dem Aussendurchmesser des inneren Ringes (Interferenz) wird die Grösse der Vorspannung eingestellt. Mit dieser Technologie entstanden in den USA mehrere Prototypen von leistungsfähigen Schwungrädern. Dieser Aufbau ist technologisch beherrschbar und wird im Folgenden ausführlich betrachtet. Sein Energiespeichervermögen liegt deutlich über dem der Variante mit Ringen aus unterschiedlichen Fasern.

In einem dritten, neuartigen Vorschlag soll das Schwungrad aus Faserverbundringen mit dünnen Zwischenlagen aus Elastomer hergestellt werden [3]. Das Energiespeichervermögen wurde ähnlich gross oder besser im Vergleich zur Variante der Interferenzfüugung erwartet. Die technologische Herstellung erscheint jedoch wesentlich einfacher. Deshalb wurde diese Variante als Erstes im Projekt des WTZ Rossau untersucht.

In der dritten Gruppe in Bild 1 sind Schwungräder mit abweichenden Faserorientierungen dargestellt. Leider zeigte sich, dass durch die unvermeidlichen Kreuzungspunkte der Fasern die Festigkeit in tangentialer und radialer Richtung vermindert wird und die Leistungsfähigkeit weit unter den erwarteten Werten bleibt.

Mögliche dreidimensionale Formen umfasst die vierte Gruppe in Bild 1. Sie wurden im WTZ Rossau 1996 neu entwickelt [4], haben Ähnlichkeiten mit einem Kegelmantel oder einer Glocke und erreichen ein sehr hohes Leistungsvermögen. Sofern an die Glocke ein Rohr aus Faserverbundmaterial anschliesst, kann damit das theoretische Leistungsvermögen des idealen rotierenden Ringes nahezu erreicht werden.

Nach dieser Bewertung wurden drei Konstruktionsvarianten, die ein sehr hohes Speichervermögen zulassen und

Nr.	Reproduzierbarkeit bei 3 Proben in %	Maximale Dehnung	zulässige kritische Spannung in MPa	Mooney-Konstante C1 in MPa	Mooney-Konstante C2 in MPa	Genauigkeit der Modellierung in %
1	75	6,6	4	0	3,5	ungenügend
2	50	9,8	0,11	0	1,3	70 ... 50
3	99	2,2	0,65	0,134	0,0625	95 ... 98
4	97	3	0,6	0	2	65
5	98	3,1	0,75	0,13	0,2	70
6	95	1,65	0,13	0,073	0	ungenügend
7	95	1,6	0,07	0,038	0	ungenügend
8	90	0,9	1,5	0,275	0,35	ungenügend

**Tabelle 1** Materialeigenschaften untersuchter Elastomere



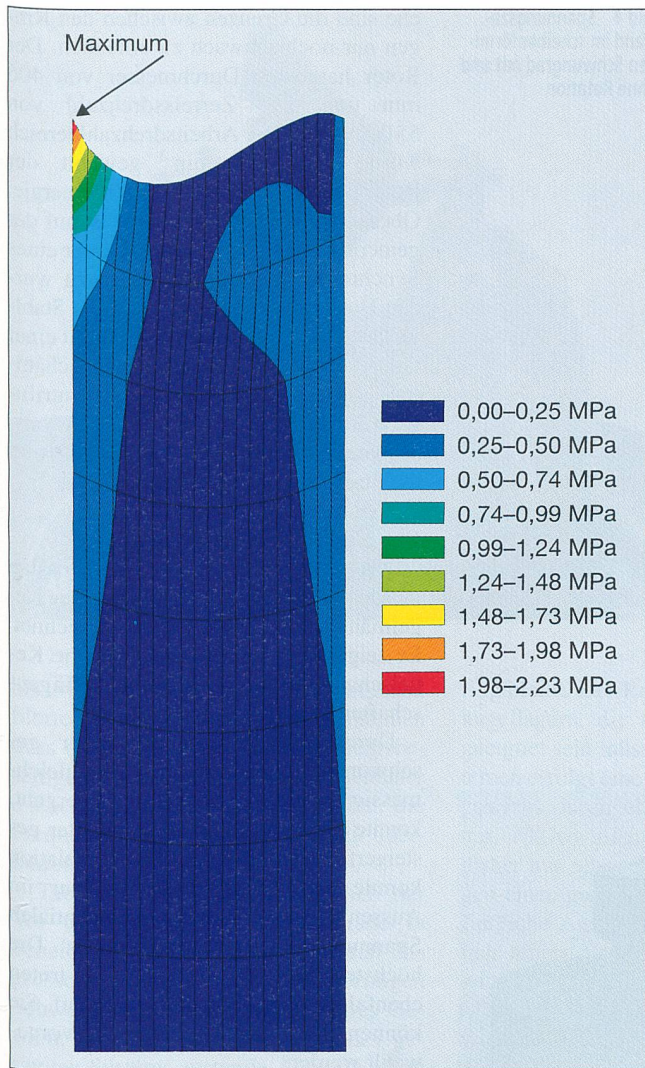


Bild 3 Vergleichsspannung in der äusseren Elastomer-Schicht bei 33% der Arbeitsdrehzahl

das FEM-Modell lieferte eine sehr gute Beschreibung.

Bei der dreidimensionalen Betrachtung des Elastomer-Multiring-Schwungrades zeigte sich in der FEM-Simulation mit den nun bekannten Materialkonstanten des Materials Nr. 3, dass in der Elastomer-Schicht an der Oberfläche genau an den Übergangsstellen vom Elastomer zum Faserverbund grosse Spannungsspitzen auftraten. Diese erreichten bereits bei 33% der geplanten Höchstdrehzahl die zulässige Zerreissspannung (Bild 3). Die Vergleichsspannung hat ein Maximum von 2,2 MPa, wobei nur 0,65 MPa für eine Dauerbelastung zulässig sind. Durch Variation der Geometrie der Kontaktflächen und des Elastomers liess sich die Spannung im besten Fall auf 50% verkleinern. Mit anderen Elastomeren sind die Verhältnisse noch ungünstiger.

Damit ist offensichtlich, dass die praktisch verfügbaren Elastomer-Schichten die Leistungsfähigkeit eines solchen Schwungrades sehr stark begrenzen. Das erreichbare spezifische Energiespeichervermögen wird nach diesen Simulationen etwa 10 Wh/kg betragen. Auf Grund des derartig schlechten Leistungsvermögens wurden die Untersuchungen zum Elastomer-Multiring-Schwungrad eingestellt und auf die experimentelle Überprüfung verzichtet.

#### Das scheibenförmige Schwungrad

Das Spannungsprofil in radialer und tangentialer Richtung für ein aus fünf Faserverbundringen unter Vorpressung zusammengesetztes Schwungrad ist in Bild 4 dargestellt. Es wurde mit einem FEM-Programm simuliert, das die Vorpressung und die temperaturabhängigen Ausdehnungen berücksichtigt.

Nach dem Zusammenbau befinden sich alle Ringe in radialer Kompression. Dieser Druck wird bis zur Stahlwelle im Innern weitergegeben. Ein Ersatz der massiven Stahlwelle durch ein Stahlrohr ist nur bei Einschränkung der Leistungs-

für eine zuverlässige technische Lösung geeignet erschienen, mit FEM-Software der Firma Ansys modelliert und genauer untersucht.

#### Das Elastomer-Multiring-Schwungrad

In Bild 2 ist der prinzipielle Aufbau dieses Schwungrades dargestellt. Es besteht aus einer Anzahl Grafitfaserringe gleicher Höhe, die jeweils durch eine dünne Schicht Elastomer miteinander verbunden sind. Die Berechnungen zeigten, dass die radialen Spannungen in jedem einzelnen Ring gering bleiben. Die Spannungen in der Elastomerschicht, die die Funktion des Dehnungsausgleichs übernimmt, bleiben infolge des geringen E-Moduls sehr klein, so dass berechnete Hoffnungen bestanden, solche Schwungräder tatsächlich betreiben zu können.

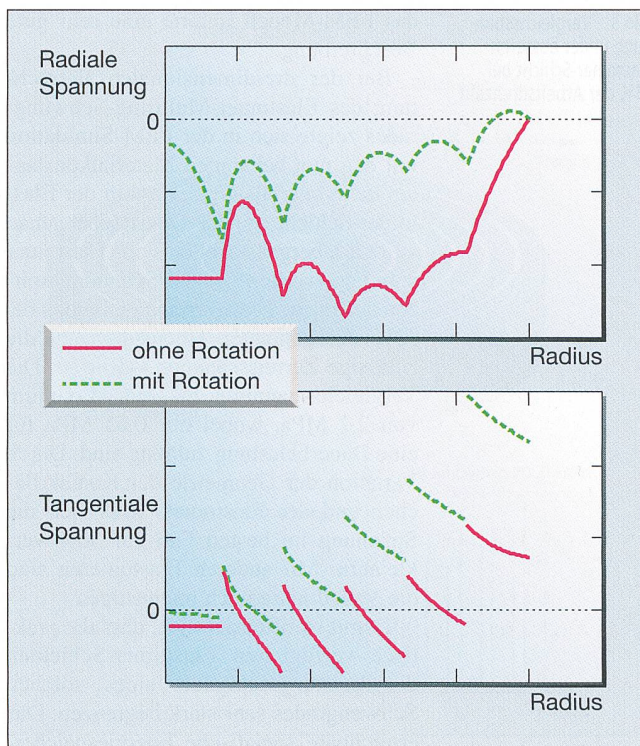
Leider zeigte sich, dass die Materialdaten geeigneter Elastomere in der Literatur nicht zu finden waren. Deshalb wurden unterschiedliche Elastormuster verschiedener Hersteller beschafft und untersucht. An Flachzugproben wurden

die ersten beiden Mooney-Konstanten zur Beschreibung der elastischen Spannungs-Dehnungs-Kurve bestimmt (Tabelle I). Anschliessend wurden die Eigenschaften dünner Elastomerschichten zwischen zwei Stahlflächen untersucht, das Ansys-Modell angepasst und die Querkontraktionszahl  $\nu$  bestimmt. Das Material Nr. 3 nach Tabelle I brachte die besten Ergebnisse. Die Proben konnten für dünne Spalten hergestellt werden, und

		Scheibenform	Glockenform
Spezifisches Energiespeichervermögen	Energie / Masse Faserverbund	60 Wh/kg	72 Wh/kg
	Energie / Gesamtsystem mit Stahlgehäuse	14 Wh /kg	10 Wh/kg
	Energie / Gesamtsystem mit Al-Ti-Gehäuse	23 Wh /kg	17 Wh /kg
Geometrie mögliches Verhältnis Höhe / Durchmesser		beliebig	grösser 1,2
Herstellungskosten		100%	60%
Besonderheiten		spezielle Vorrichtungen zur Montage der Ringe	spezielle Einrichtung zur Herstellung des Rotors, Auswuchtung in drei Ebenen nötig

Tabelle II Vergleich von Schwungrädern in Scheiben- und Glockenform



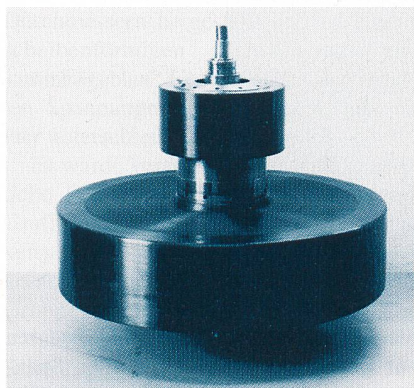


**Bild 4** Spannungszustand im scheibenförmigen Schwungrad mit und ohne Rotation

fähigkeit des Schwungrades möglich, da dann die Druckvorspannungen geringer gewählt werden müssen. Bei Rotation wird die Druckspannung durch die Zentrifugalkraft reduziert. Das Schwungrad ist jedoch so stark vorgespannt, dass nur im äusseren Ring eine ganz geringe Zugspannung entsteht, die noch genügend sicher unter der zulässigen radialen Spannung liegt.

Im Gegensatz dazu verhalten sich die tangentialen Spannungen. Infolge des Zusammensetzens der Ringe haben die Spannungswerte an den Grenzflächen der Ringe keinen stetigen Verlauf, sondern bilden eine typische Treppenfunktion. Dabei erreicht die tangentielle Spannung im äussersten Ring bereits nach der Montage 40% der Höchstlast. Da die inneren Ringe weniger belastet werden, bietet es sich an, diese aus einem kostengünstigen Faserverbundmaterial mit geringerer Festigkeit herzustellen.

Die Fertigung erfordert eine besondere Technologie, damit sich beim Zusammensetzen die geplanten inneren Spannungen in einem engen Intervall einstellen. Da die Überlappungen zwischen den einzelnen Ringen dazu auf 30 µm genau eingestellt werden müssen, gestalten sich die Technik der Vorbereitung und die Montage der Ringe sehr kompliziert. Der Spannungszustand nach dem Aufbau wird mit Dehnmessstreifen genau kontrolliert. So kann die Qualität einfach ermittelt werden, und die zulässige Höchst-drehzahl des fertigen Schwungrades lässt sich festlegen.



**Bild 5** Rotor eines scheibenförmigen Schwungrades

Das im so gefertigten Testrotor nach Bild 5 verwendete Schwungrad besteht aus vier Ringen. Nach der Montage werden die Dehnmessstreifen mechanisch entfernt, und das Schwungrad wird über-schliffen. Durch die sehr glatte Oberflä-

che sind die Grenzen zwischen den Ringen nur noch schwach zu erkennen. Der Rotor hat einen Durchmesser von 406 mm und eine Zerreissdrehzahl von 55 000 min<sup>-1</sup>. Der Arbeitsdrehzahlbereich wurde bis 25 000 min<sup>-1</sup> gewählt, der Rotor speichert dabei 400 Wh Energie. Oberhalb der Schwungscheibe ist auf der gemeinsamen Stahlwelle der Läufer eines Synchronmotors angeordnet. Dazu wurden Hochleistungsmagnete auf die Stahlwelle geklebt und anschliessend mit einer Graphitfaserbandage gegen eine mechanische Beschädigung durch die Zentrifugalkräfte gesichert. Für die Präzisionsauswuchtung sind Gewindebohrungen in die Stahlwelle eingebracht.

## Das glockenförmige Schwungrad

Als Neuentwicklung des WTZ Rosslau wurde ein Schwungrad in Form eines Kegelmantels oder einer Glocke berechnet. Es zeigte sich, dass bereits einfache Kegelschwungräder ausgezeichnete Eigenschaften erwarten lassen (Bild 6).

Durch die Verwendung einer geschwungenen Mantelkurve, die gleichmässig in eine Zylinderform übergeht, konnte die Leistungsfähigkeit weiter gesteigert werden. Bei der FEM-Simulation konnte erreicht werden, dass nur im Aussenzylinder die höchsten tangentialen Spannungen auftreten (Bild 7). Die höchsten radialen Spannungen treten ebenfalls nur im Zylinderbereich auf. Sie können durch die Dicke genau vorge-wählt werden.

In Bild 8 ist das berechnete Schwungrad mit einem Durchmesser von 406 mm nach der Herstellung zu sehen. Die Berstdrehzahl beträgt 56 000 min<sup>-1</sup>. Als obere Arbeitsdrehzahl wurde 25 000 min<sup>-1</sup> mit 400 Wh Energieinhalt gewählt.

Es wurden drei unterschiedliche Formen von glockenförmigen Testrotoren aufgebaut und Schleudertests damit durchgeführt. Eine kritische Eigenschwingung trat dabei zutage, die zum Bersten der Schwungräder schon bei 30

	Piller	Magnet Motor		CCM	BMW Fiat	Urenco
Leistung	1,65 MW kurzzeitig 150 kW dauernd	100 bis 150 kW	450 bis 900 kW	300 bis 600 kW	40 kW	5 kW
Energie	4,6 kWh	2 kWh	9 kWh	5,3 kWh	0,4 kWh	3 kWh
Drehzahl in min <sup>-1</sup>	3300	12 000	18 000	15 000	60 000	50 000
Durchmesser	1200 mm	640 mm	780 mm	1000 mm	250 mm	400 mm
Höhe	2200 mm	660 mm	750 mm	1000 mm	580 mm	1000 mm
Gewicht	6000 kg	400 kg	600 kg	800 kg	60 kg	110 kg
Stand der Entwicklung	Serien- fertigung	Einzel- fertigung	Prototyp	Prototyp	Prototyp	Prototyp

**Tabelle III** Technische Daten von Schwungradspeichern



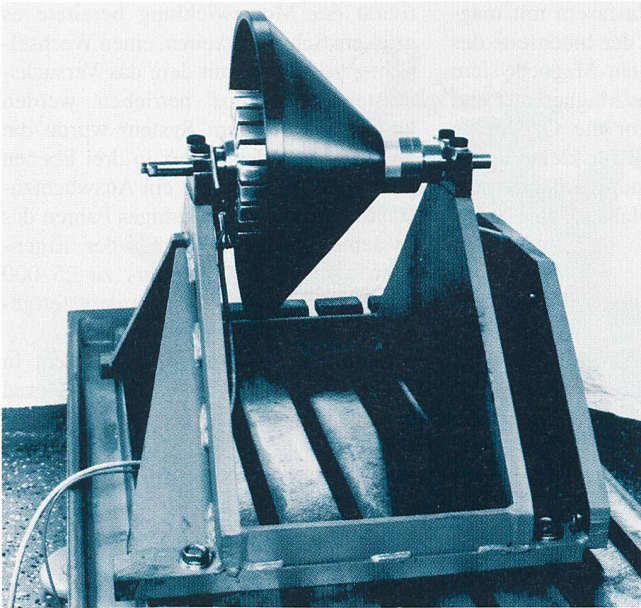


Bild 6 Versuchsaufbau mit einem kegelförmigen Schwungrad

bis 50% der geplanten Höchstdrehzahl führte. Durch konstruktive Massnahmen liess sich diese Eigenfrequenz nicht beseitigen, so dass erst eine gewissenhafte 3-Ebenen-Auswuchtung es erlaubte, die Frequenz ohne Schwierigkeiten zu überfahren.

Tabelle II bietet einen Vergleich der Vor- und Nachteile der Schwungräder in Scheiben- und Glockenform. Durch das grössere Volumen des glockenförmigen Schwungrades kommt ein grösseres Gewicht des Gehäuses und damit des gesamten Systems zustande. Deshalb ist zu erwarten, dass für die Anwendungen auf Fahrzeugen die scheibenförmigen Schwungräder bevorzugt werden, diese haben die geringsten Abmessungen und das grösste Leistungsvermögen bezogen auf das gesamte System. Für stationäre Anwendungen hat jedoch das glockenförmige Schwungrad Vorteile durch geringere Herstellungskosten und einen geringeren Materialaufwand an Grafitfasern, sofern es gelingt, das 3-Ebenen-Auswuchten sicher zu beherrschen.

## Der Schwungradspeicher

Das Schwungrad ist die entscheidende Hauptkomponente eines Schwungradspeichers. Der Systemaufbau eines solchen elektrischen Energiespeichers ist in der Schnittzeichnung Bild 9 dargestellt.

Zur Einkopplung der elektrischen Leistung wird der Läufer eines permanentmagneterregten Synchrongenerators mit dem Schwungrad auf einer Welle starr verbunden. Diese Form hat sich durchgesetzt, da so sehr hohe Leistungen auf kleinem Raum realisiert werden können und die Erwärmung des Läufers ge-

ring bleibt. Der Rotor läuft in Präzisionskugellagern, die für die hohe Drehzahl geeignet sein müssen. Bei grösseren Systemen erfolgt eine Entlastung vom Rotorgewicht durch einen Permanentmagneten. Aktive magnetische Lager werden bisher nur sehr selten benutzt, sie benötigen einen grösseren Bauraum, eine empfindliche Ansteuerung und sind wesentlich teurer als Kugellager. Das System wird in einem Gehäuse untergebracht. Mit einer mechanischen Vakuumpumpe wird ein Unterdruck  $<1$  mbar erzeugt, um die Luftreibung zu reduzieren.

In Bild 10 sind die weiteren notwendigen Bestandteile dargestellt: Eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) übernimmt die Überwachung der Senso-

ren, die den fehlerfreien Lauf des Schwungrades kontrollieren. Die Energie wird durch einen Wechselrichter ein- und ausgekoppelt, der für die hohe Frequenz des Motorgenerators geeignet sein muss.

## Stand der Technik

In Europa gibt es mehrere Einrichtungen, die an der Entwicklung von Schwungradspeichern arbeiten. Eine Übersicht der aus Literatur und Vorträgen bekannten Systeme ist in Tabelle III gegeben.

Das System der Piller GmbH besteht aus einer Synchronmaschine mit regelbarer Erregung und einem Stahlschwungrad, das in einer Heliumatmosphäre rotiert. Es wurde für die Überbrückung kurzzeitiger Stromausfälle entwickelt. Solche USV-Anlagen hoher Leistung werden in Chipfabriken, Flughäfen, Fernsehstationen und ähnlichen Einrichtungen eingesetzt. Zwei Systeme sind für die Stabilisierung des Strassenbahnnetzes in Hannover installiert. Hierbei kann nur eine Leistung von etwa 150 kW gespeichert und abgegeben werden, da sonst das System thermisch überlastet werden würde. Das Kugellagersystem wird durch einen Elektro-Hubmagneten entlastet. Es sind fettgeschmierte Lager eingesetzt, die nach sechs Monaten gewartet werden müssen und eine Lebensdauer von sieben bis acht Jahren erwarten lassen.

Das 2-kWh-System der Firma Magnet Motor wurde bereits 1987 entwickelt. Es ist inzwischen in über 20 Bussen als Bremsenergiespeicher eingesetzt. Eine Besonderheit des Systems ist die eisenlose Wicklung, die sehr hohe Stromdichten durch eine direkte Ölkühlung zulässt.

Bild 7 FEM-Berechnung der tangentialen Spannungen in einem glockenförmigen Schwungrad

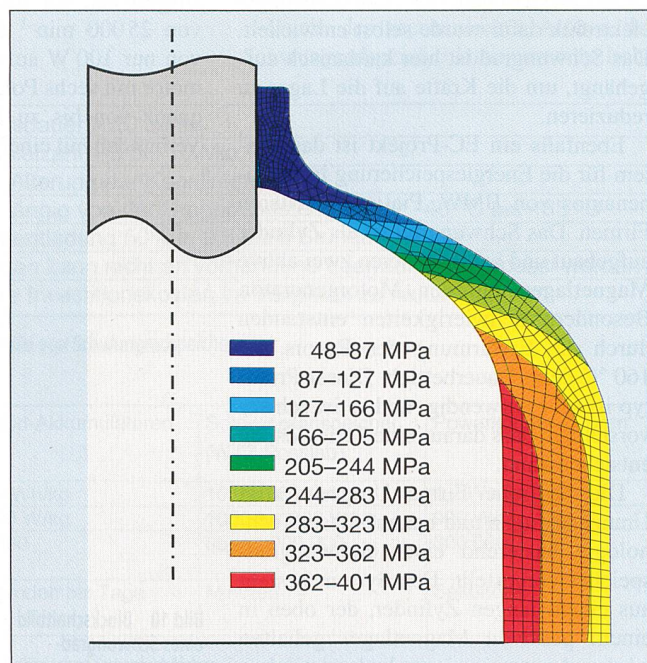






Bild 8 Faserverbundschwungrad in Glockenform

Gleichzeitig sind die Leerlaufverluste relativ gering (unter 500 W). Auch hier werden fettgeschmierte Kugellager benutzt, die eine regelmässige Wartung erforderlich machen [5]. Ein zweites System der gleichen Firma wurde im März 2000 zur Stabilisierung des Strassenbahnnetzes in Köln im Rahmen eines EC-Projektes gemeinsam mit Siemens aufgebaut. Dieser Speicher hat eine wesentlich grössere Leistung. Bei beiden Systemen von Magnet Motor wird eine relativ aufwendige elektrische Ansteuerung genutzt. Trotz der hohen Drehzahl werden Motoren mit grossen Polzahlen verwendet. Um die Schaltfrequenz niedrig zu halten, wird dann jede einzelne Polwicklung, mit einer einzelnen IGBT-Stufe (Insulated Gate Bipolar Transistor) angesteuert.

Das Centrum voor Constructie en Mechanica Eindhoven (CCM) in den Niederlanden entwickelte ein System zur Speicherung der Bremsenergie in einem Diesel-elektrischen Bus. Die Leistungselektronik dafür wurde selbst entwickelt. Das Schwungrad ist hier kardanisches aufgehängt, um die Kräfte auf die Lager zu reduzieren.

Ebenfalls ein EC-Projekt ist das System für die Energiespeicherung in Personautos von BMW, Fiat und weiteren Firmen. Das Schwungrad ist als Zylinder aufgebaut und hat im Inneren zwei aktive Magnetlager und den Motorgenerator. Besondere Schwierigkeiten entstanden durch die Erwärmung des Rotors auf 160 °C beim Dauerbetrieb. Dieser Prototyp ist sehr aufwendig, und es ist schwer vorstellbar, dass daraus eine Serienlösung entstehen kann.

Die britische Firma Urenco fertigt Uranzentrifugen und hat auf dieser Technologie basierend einen Schwungradspeicher vorgestellt. Das System besteht aus einem langen Zylinder, der oben in einem passiven Magnetlager gehalten wird und unten in einem hydrostatischen

Lager läuft. Durch Glasfasern mit magnetischem Staub ist in der Innenseite des Schwungradzylinders ein Magnetsystem eingebracht, das für das Magnetlager und für den Motorgenerator die Gegenpole bildet. Das System soll für kleine unterbrechungsfreie Spannungsanlagen zum Einsatz kommen. Geplant ist eine Erhöhung der Leistung [6].

## Schwungradsysteme des WTZ

### Rosslau

Bisher wurden zwei Versuchsmuster von Schwungradspeichern aufgebaut. In Bild 11 ist das System mit dem Glocken-

aktivität der Motorwicklung bereitete es grössere Schwierigkeiten, einen Wechselrichter zu finden, mit dem das Versuchsmuster problemlos betrieben werden konnte. Mit diesem System wurde die Auswuchtung des Rotors in drei Ebenen praktisch realisiert und ein Auswuchtzustand erreicht, der ein ruhiges Fahren des Systems auch im Bereich der Eigenschwingung des Rotors bis zu 25 000 min<sup>-1</sup> ermöglichte. Es werden fettgeschmierte Lager benutzt.

Der zweite Prototyp ist mit dem in Bild 6 dargestellten Scheibenschwungrad ausgerüstet. Das System ist ebenfalls

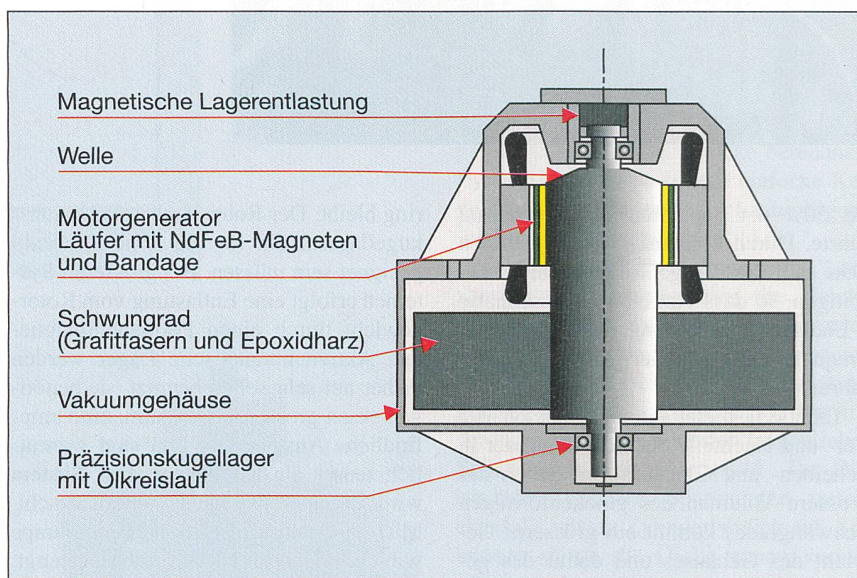


Bild 9 Schematischer Aufbau des Schwungradspeichers

schwungrad aus Bild 8 zu erkennen. Es ist mit einem eisenlosen Synchronmotor ausgerüstet, der bei der Arbeitsdrehzahl von 25 000 min<sup>-1</sup> einen Leerlaufverlust von nur 100 W aufweist. Der Synchronmotor mit sechs Polen wird mit einer Frequenz von bis zu 1250 Hz angesteuert. Verbunden mit einer sehr geringen Induk-

für eine Leistung von 60 kW und ein Speichervermögen von 0,4 kWh ausgelegt (Bild 12). Der Motorgenerator hat hier eine normale Wicklung und erreicht dadurch Leerlaufverluste von 400 W bei voller Drehzahl. Hier wurden ölgeschmierte Kugellager eingesetzt, und das Lagersystem wurde entsprechend

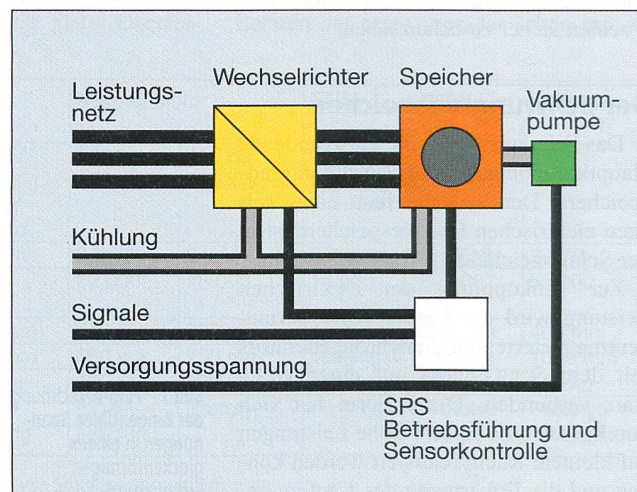


Bild 10 Blockschaubild eines Schwungradspeichers



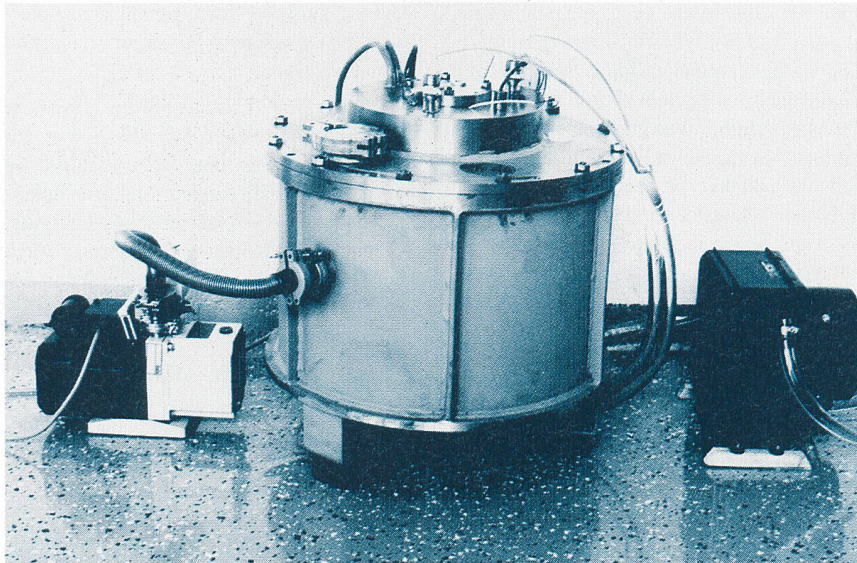


Bild 11 Erster Prototyp für 60 kW mit einem glockenförmigen Schwungrad

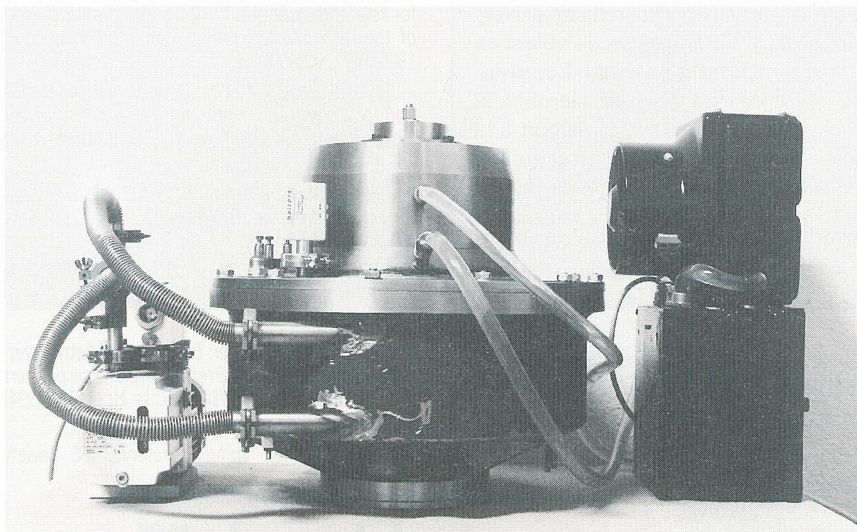


Bild 12 Zweiter Prototyp mit einem scheibenförmigen Schwungrad

den Erfahrungen des ersten Prototyps verbessert. Dadurch konnte der Reibungsverlust in den Lagern bei 25 000  $\text{min}^{-1}$  von 700 W auf 250 W vermindert werden.

Auf der Basis der Erfahrungen an den beiden Prototypen werden zurzeit zwei leistungsfähige Speicher mit den Parametern 150 kW/2 kWh und 350 kW/6 kWh entwickelt. Beide Systeme werden ein scheibenförmiges Schwungrad haben und für den mobilen Einsatz geeignet sein.

Der Motorgenerator wird so ausgelegt, dass übliche, für Synchronmotoren geeignete Wechselrichter verwendet werden können. Die Kugellager werden mit einem internen Ölkreislauf geschmiert, so dass die Systeme im Wesentlichen wartungsfrei laufen.

### Sicherheit von Schwungradspeichern

Im WTZ Rosslau werden die Faserverbundrotoren auf eigenen Anlagen hergestellt. Die Qualität der Faserverbunde wird wöchentlich durch die Anfertigung von neun Ringproben kontrolliert, mit denen die Zerreißfestigkeit ermittelt wird. Das inzwischen vorliegende statistische Material gestattet die Bestimmung der Weibull-Verteilung der Festigkeit des Fasermaterials. Unter der Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors für die geplante Lastspielzahl von 3 bis 6 Mio. je nach Einsatzfall und des zweiten Sicherheitsfaktors, der die Grösse des Rotors berücksichtigt, ist eine zuverlässige Auslegung des Schwungradspeichers möglich.

Unabhängig von diesem Aufwand kann eine geringe Restwahrscheinlichkeit nicht völlig ausgeschlossen werden, dass der Rotor vor dem Erreichen der Lebensdauer bersten kann. In diesem Fall kann der gesamte äussere Ring zu kurzen Faserverbundstücken zerplatzen, die augenblicklich an der Gehäusewand reiben. Das würde zu einer hohen Beanspruchung des Gehäuses bis zum Losreißen aus der Verankerung führen.

In der Lösung des WTZ Rosslau ist deshalb ein Berstschutzring ebenfalls aus Fasermaterial vorgesehen, der drehbar zwischen Gehäusewand und Schwungrad angeordnet ist. Dadurch wird erwartet, dass im Berstfall keine Schäden für das Gehäuse und die Umgebung entstehen. Entsprechende Versuche zum Nachweis der Funktion des Berstschutzringes sind im Rahmen der Entwicklung vorgesehen.

### Zur Leistungsfähigkeit von Schwungradspeichern

Durch den mechanischen Aufbau der Schwungradspeicher kann eine sehr hohe

Vorteile	Lebensdauer > 20 Jahre
	Lastspielzahl > 3 bis 10 Mio.
	keine Alterung der Kennlinien
	unabhängig von der Umgebungstemperatur $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$
Nachteile	Selbstentladung 50% in 0,5 bis 5 Stunden
	Volumen kann nicht an vorhandene Leerräume angepasst werden
	höhere Investitionskosten im Vergleich zu Akkumulatoren

Tabelle IV Vor- und Nachteile von Schwungradspeichern

Parameter	NiCd-Akkumulatoren	Schwungradspeicher (WTZ Rosslau)	Powerkondensatoren
Energiedichte	45 Wh/kg	10 bis 20 Wh/kg	1,2 Wh/kg
Leistungsdichte	200 W/kg	1000 bis 300 W/kg	900 W/kg
Lebensdauer	2000	über 3 000 000	300 000
Zykluszahl			
Bevorzugte Speicherdauer	Stunden bis Tage	Minuten	Sekunden

Tabelle V Eigenschaften elektrischer Energiespeicher



Lebensdauer erzielt werden. Eine Laufzeit von 20 Jahren mit 10 Mio. Lade- und Entladezyklen ist möglich. Dabei gibt es mit wachsender Betriebszeit keine Veränderungen der Leistungsfähigkeit. Die Kennlinien des Motorgenerators und das Speichervermögen bleiben während der gesamten Betriebsdauer unverändert. Das ist ein wesentlicher Vorteil des Systems, weil mit chemischen Akkumulatoren überhaupt nicht zu erreichen.

In Tabelle IV sind weitere Vor- und Nachteile zusammengefasst.

Hinsichtlich der spezifischen Leistungsfähigkeit füllen die Schwungrad-

speicher eine Lücke für die Speicherung elektrischer Energie im Minuten-Bereich. Für Langzeitspeicher über Stunden und Tage sind chemische Akkumulatoren vorteilhafter, da Schwungradspeicher sich in einigen Stunden selbst entladen. Die Leistungsdaten typischer Speicher sind in Tabelle V verglichen. Dabei ist berücksichtigt, dass Schwungradspeicher je nach Bedarf an ein hohes Speichervermögen mit geringer Leistung oder umgekehrt an hohe Leistung bei verhältnismässig geringem Energieinhalt angepasst werden können. Deshalb schwanken die Energiedichten und Leistungsdichten in

Abhängigkeit des jeweiligen Grössenverhältnisses zwischen Motorgenerator und Schwungrad.

Durch ihre Eigenschaften sind die Schwungradspeicher besonders gut für die Speicherung der Bremsenergie in elektrischen Fahrzeugen und in Gleichstromnetzen des Nahverkehrs geeignet. Aber auch der Einsatz in anderen örtlich im Minutenbereich stark schwankend belasteten Netzen, zum Beispiel Krananlagen, ist möglich.

Sofern es gelingt, solche Speicher zu sicher funktionierenden Produkten zu machen, können sie einen erheblichen Beitrag zur Energieeinsparung im Nahverkehr und im Transport leisten.

### Nouveaux développements dans le domaine des accumulateurs à volant

Dans le domaine des accumulateurs à volant, les rotors à fibres composites représentent l'état actuel de la technique. Trois formes particulièrement performantes, le volant multibagues à couches intermédiaires élastomères, le volant en forme de disque et le volant en forme de cloche, sont décrites en détail. Les avantages des systèmes d'accumulateur à volant sont la longue durée de vie utile, la grande insensibilité à la température ambiante et le faible poids par rapport à la puissance. L'inconvénient est une auto-décharge importante qui ne permet qu'une charge jusqu'à 12 heures au maximum. Une autre limitation est imposée par les frais élevés qui font que l'utilisation n'est rentable que pour des puissances importantes de l'ordre de 50 kW à 500 kW et plus de quatre cycles de charge à l'heure. Les accumulateurs à volant permettent de combler la lacune entre les accumulateurs chimiques à long terme et les condensateurs de puissance comme accumulateurs à court terme.

On s'attend qu'ils servent d'ici quelques années à des applications comme l'accumulation de l'énergie de freinage de véhicules, la stabilisation des réseaux à courant continu d'entreprises de transport à courte distance et les réseaux électriques à bord de navires.

### Literatur

- [1] R. C. Flanagan: Design, manufacture and test for four energy density fibre composite rotors. Proc. of the 21th Intersoc. Energy Convers. Engin. Conf. 1986 vol. 2, 901-907.
- [2] D. M. Ries, J. A. Kirk: Design and manufacturing for a composite multi-ring flywheel. Proc. of the 27th Intersoc. Energy Convers. Engin. Conf. 1992 vol. 4, 43-48.
- [3] F. Täubner, H. D. Jakobi, G. Kuka: Schwungrad für hohe Drehzahlen. Offenlegungsschrift DE 195 41 901 A1 vom 30.5.1996.
- [4] F. Täubner, M. Elze: Schwungrad für hohe Drehzahlen. Patentschrift DE 196 51 668 C2 vom 14.01.1999.
- [5] G. Reiner, K. Reiner: Energetisches Betriebsverhalten eines permanenterregten Drehmassespeichers in Theorie und Praxis. VDI-Berichte Nr. 1168 (1994) 59-81.
- [6] R. Dettmer: Spinning reserve. IEE Review 1(1997)36-37.

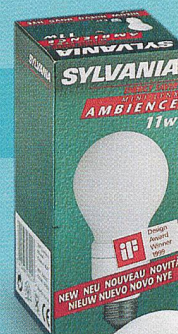


Mini-Lynx Ambience: Die schönste Form zu sparen

# SYLVANIA

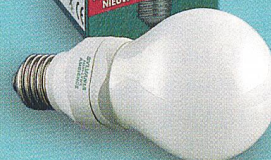
**Die entscheidende Idee:** Sylvania verbindet alle Vorteile von Energiesparlampen mit der dekorativen Glühlampenform. Der matte Echtkolben sorgt für eine sanfte und angenehme Lichtatmosphäre. Die Ambience Energiesparlampen gibt es in 7, 11, 15 und 20 Watt mit Sockel E27.

**Sylvania. Eine Idee mehr Licht.**



Energiesparlampen  
Mini-Lynx  
Ambience

**if**  
Design  
Award  
Winner  
1999



Sylvania Lighting AG - 4, Chemin des Léchères  
CH-1217 Meyrin - Tel. 022/7198580 - Fax 022/7198581

## Blindenergiekosten sind unnötig

**detron**

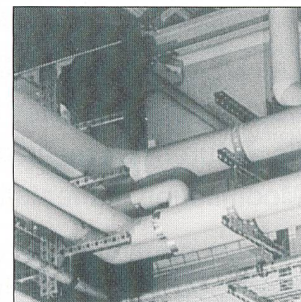
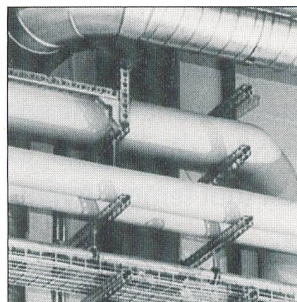
## setzt Kosten auf Null

Wir beraten, analysieren, beurteilen Elektroenergieverbräuche und schlagen wirkungsvolle Lösungen zur Reduktion des Blindenergieverbrauches vor, so beseitigen wir Blindenergiekosten. Mehr als 30 Jahre Erfahrung, die richtige Gerätepalette und unsere Fachkompetenz sind Garant für langlebige, wirtschaftliche Lösungen.



**detron ag**

Industrieautomation - Zürcherstrasse 25 - CH4332 Stein  
Telefon 062-873 16 73 Telefax 062-873 22 10



## MULTIFIX Schienenmontagesystem LANZ MULTIFIX Rohrschellen NEU

Für die saubere, platz- und kostensparende **koordinierte Installation** der Elektro-, Sanitär-, HLK- und Medienleitungen in Industrie-, Verwaltungs- und Zweckbauten ist MULTIFIX:

- Schnell und professionell montierbar
- Einfach zu planen: wenig Systemteile. Hoch belastbar.
- Abrutschsicher verzahnt. ACS schockgeprüft 3 bar
- Nur 4 Rohrschellen für 15 – 115 mm ø

**Fortschrittlich planen und montieren: MULTIFIX! (pat.) LANZ für Beratung, Offerte und preisgünstige Lieferung:**

**lanz oensing ag Tel. 062 388 21 21 Fax 062 388 24 24**

☐ Das MULTIFIX Schienenmontagesystem und die MULTIFIX Rohrschellen interessieren mich! Bitte senden Sie Unterlagen.

☐ Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!

Name/Adresse/Tel. \_\_\_\_\_



**lanz oensing ag**  
CH-4702 Oensingen • Tel. ++41 062/388 21 21



Der grösste Bereich an Impulsprüfgeräten  
bis 100 kV und 100 kA  
von

EMC -  
PARTNER



Oberwellen und Flickermeter "dreiphasig"



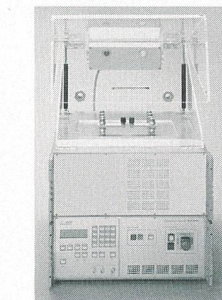
EMV: ESD, EFT, SURGE, DIPS, V- VARIATION



EMC-PARTNER AG  
Baselstr. 160  
4242 Laufen

Tel: 061 763 01 11 Fax: 061 763 01 15  
Email: m.lutz@emc-partner.ch  
Web site: www/emc-partner.com

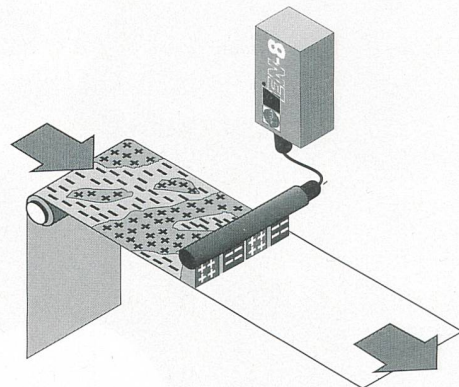
EMC -  
PARTNER



MIG: Modulare Impulse Generatoren  
zur Prüfung von  
Flugzeugelektronik  
Schutzelemente  
Kondensatoren  
etc.



HAUG-Ionisationssysteme beseitigen  
störende statische Elektrizität.



Statische Aufladungen führen in vielen Fertigungs-  
prozessen zu Störungen. HAUG-Ionisationssysteme  
lösen dieses Problem bei der Folien- und Papierverarbeitung  
sowie in der Textil- und Kunststoffindustrie.

HAUG BIEL AG

Johann-Renfer-Strasse 60 • Postfach 52 • CH-2500 Biel-Bienne 6  
Telefon 032 344 96 96 • Telefax 032 344 96 97

Finis les chemins à grille, les chemins de câbles et les conduites montantes!  
Il existe maintenant les Multi-chemins LANZ: un chemin pour  
tous les câbles

- Les Multi-chemins LANZ simplifient la planification, le métré et le décompte!
- Ils diminuent les frais d'agencement, d'entreposage et de montage!
- Ils assurent de meilleurs profits aux clients: excellente aération des câbles
- Modification d'affectation en tout temps. Avantageux. Conformes aux normes CE et SN SEV 1000/3.

Pour des conseils, des offres et des livraisons à prix avantageux, adressez-vous au grossiste en  
matériel électrique ou directement à



lanz oensingen sa e-mail: info@lanz-oens.com  
CH-4702 Oensingen • Tél. 062/388 21 21 • Fax 062/388 24 24

Kf 5

**Ohne sichere Stromversorgung läuft nichts!!!**

Wir projektieren, produzieren, installieren und warten Produkte für Telecom /  
IT / Prozesssteuerung / Bahnsicherungsanlagen AC-DC-Gleichrichter 6 bis 225 A /  
AC-DC-Anlagen 6 bis 10 000 A / DC-DC-Wandler / DC-AC-Wechselrichter

**Sicherheit ohne  
Energieverschwendung**

**APC**  
Legendary Reliability™

**GUTOR**  
UPS ENGINEERING

**GUTOR Electronic AG**

CH-5430 Wettingen  
Tel. +41 (0)56 437 34 34  
Fax +41 (0)56 437 34 54  
http://www.gutor.ch

Sie finden uns an der TeleNetCom, Halle 4, Stand 123

