

# Vom Hydrogenerator über rotierende Umformer zum vollstatischen Umrichter : die zentrale 16 2/3-Hz-Bahnstromversorgung in Deutschland, Österreich und der Schweiz

Autor(en): Schäfer, René

Objektyp: Article

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **84 (1993)**

Heft 11

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-902699>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Gleichzeitig mit der Einführung der elektrischen Bahntraktion begannen Deutschland, Österreich und die Schweiz, ein autonomes, vom Landesnetz unabhängiges  $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnnetz aufzubauen. Der Bahnstrom wurde vorerst mit Wasserkraftwerken und später auch mit Wärmekraftwerken erzeugt. Seit 1932 kann über Frequenz-Umformer zudem Energie mit dem Landesnetz ausgetauscht werden. Heute halten immer mehr vollstatische Stromrichter-Lösungen sowohl in der Erregung von Einphasenmaschinen als auch bei 50– $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnnetzakupplungen Einzug. Der Artikel gibt einen Überblick über die vielfältigen Techniken zur Erzeugung von  $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnstrom.

# Vom Hydrogenerator über rotierende Umformer zum vollstatischen Umrichter

## Die zentrale $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnstromversorgung in Deutschland, Österreich und der Schweiz

■ René Schäfer

Zu Beginn der elektrischen Bahntraktion – zunächst im Versuchsbetrieb, dann im Vollbahnbetrieb (siehe Kasten) – wurde der  $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnstrom in Wasserkraftwerken erzeugt. Damit die Traktionsenergie über den Fahrdrabt mit hoher Spannung auf die Triebfahrzeuge übertragen und dort durch einen Transformator in eine für die Triebmotoren verträgliche Spannung umgesetzt werden konnte, wurde das Einphasenwechselstromsystem eingeführt. Wegen technischer Probleme beim Bau von Triebmotoren für 50 Hz reduzierte man die Frequenz auf  $16\frac{2}{3}$  Hz.

Neben der  $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahntraktion wurden in Europa auch noch andere Bahntraktionsysteme eingeführt. Die wichtigsten davon sind die 50-Hz-Traktion (ab 1950) sowie die

beiden Gleichspannungssysteme mit 1500 und 3000 V. Das Bild 1 gibt eine Übersicht über die in Europa verwendeten Traktionssysteme. An dieser Stelle soll aber nur die zentrale  $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnstromversorgung (d.h. die Bahnstromversorgung über ein Verbundnetz), die heute in Deutschland, Österreich und der Schweiz angewendet wird, näher beschrieben werden.

### Die zentrale $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnstromversorgung

Die Betreiber der Bahnen in Deutschland, Österreich und der Schweiz bauten aus wirtschaftlichen Überlegungen, von Beginn der  $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahntraktion an, ein autonomes, vom Landesnetz unabhängiges, einphasiges Bahnstromverbundnetz auf. Die Fahrdrabt-

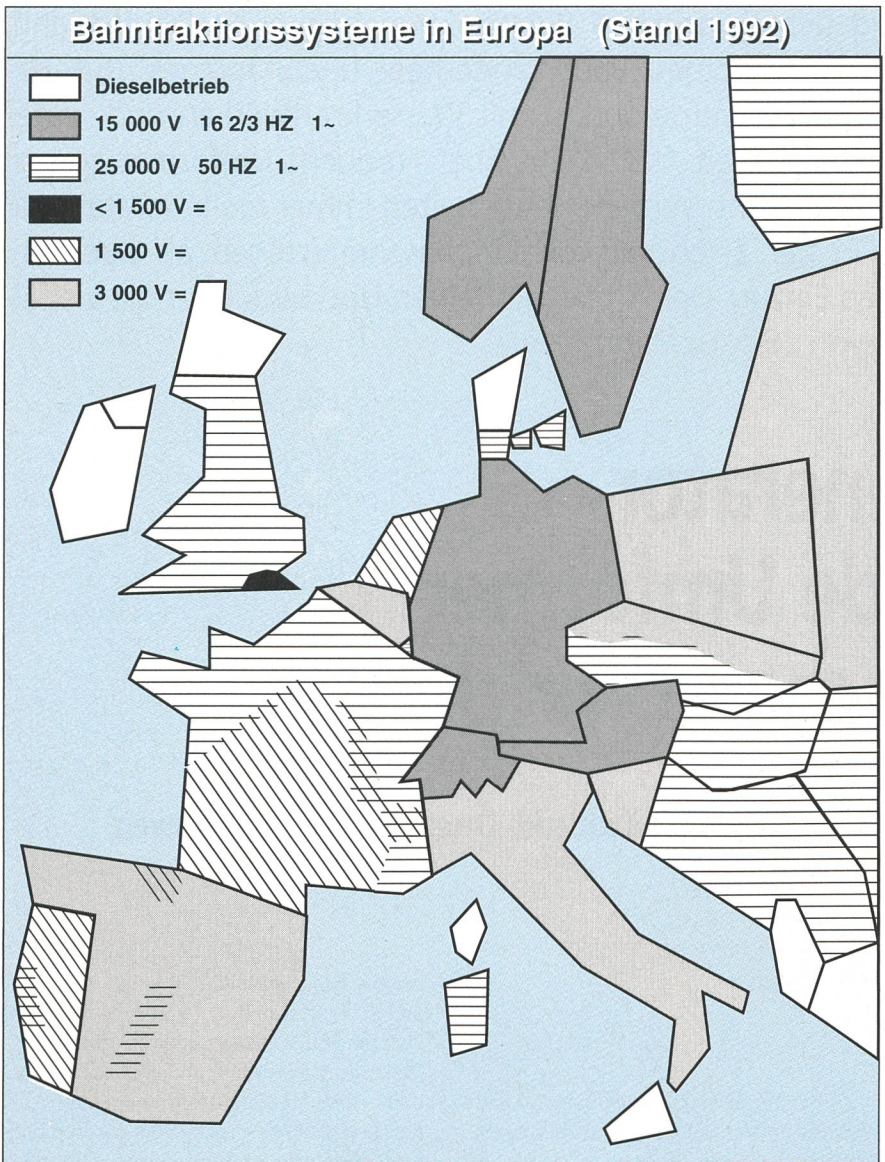
Dieser Aufsatz ist eine überarbeitete Fassung des Vortrages «Die  $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnstromversorgung aus dem Landesnetz», den der Autor an der ETG-Tagung vom 10. November 1992 in Zürich-Airport zum Thema «Die Zukunft des Schienenverkehrs» hielt.

#### Adresse des Autors:

René Schäfer, Dipl. El.-Ing. HTL,  
ABB Kraftwerke AG,  
KWHV-1/Bahnstromversorgung, 5401 Baden.

#### Die Anfänge der elektrischen Bahntraktion

1905	Versuchsbetrieb Seebach–Affoltern (ZH) und Murnau–Oberammergau in Deutschland
1910	Spiez–Frutigen (BLS Lötschbergbahn, Schweiz) und Martigny–Orsière (MO, Schweiz)
1913	Frutigen–Brig (BLS Lötschbergbahn, Schweiz) und St.Moritz–Scul (RhB Rhätische Bahn, Schweiz)
1921	Erstfeld–Biasca (SBB Gotthardbahn, Schweiz)
1923	Kiruna–Narvik (Lapland-Bahn in Schweden/Norwegen)
1925	Arlbergbahn (ÖBB, Österreich)



**Bild 1 Übersicht über die in Europa verwendeten Traktionssysteme**  
 Gleichspannungssysteme mit rund 500–2500 V werden in fast allen Ländern auch für Strassenbahnen, Privatbahnen usw. verwendet

Einspeisung aus diesem Bahnstromverbundnetz, das die Unterwerke, die 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Kraftwerke und die Umformer- und Umrichterwerke miteinander verbindet, erfolgt über Unterwerke (16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Trafostationen). Um die vorhandenen 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Energieerzeugungsanlagen noch besser zu nutzen, bauen Deutschland, Österreich und die Schweiz ihre Hochspannungsnetze zudem mehr und mehr zu einem mitteleuropäischen 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Bahnstromverbundnetz zusammen (Bild 2).

Die 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Bahnenergie wird heute aus Wärmekraftwerken, aus Wasserkraftwerken und aus Umformer-/Umrichterwerken bezogen. Die Anteile gehen aus Tabelle I hervor. Über die Art der dazu von ABB gelieferten Anlagen gibt Tabelle II einen Überblick.

Das zentrale Speisungskonzept über ein 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Hochspannungsverbundnetz bietet

bezüglich Wirtschaftlichkeit, Verfügbarkeit und Spitzenlastabdeckung optimale Verhältnisse. Die Bauleistungen der 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Kraftwerksgeneratoren liegen zwischen 5 und 150 MW, und die der Umformer- und Umrichtereinheiten zwischen 2 und 75 MW. Das Bild 3 zeigt das Konzept der verschiedenen Bahnstromversorgungsanlagen mit deren

Herkunft der Bahnenergie	Deutschland (DB)	Österreich (ÖBB)	Schweiz (SBB)
Wärmekraftwerke	ca. 58%	–	–
Wasserkraftwerke	ca. 25%	ca. 59%	ca. 65%
Umformer-/Umrichterwerke	ca. 17%	ca. 41%	ca. 35%

Tabelle I Herkunft der 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Bahnenergie

Fahrdrahteinspeisung über das bahneigene 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Hochspannungsnetz.

**Wasserkraftwerke mit Hydrogeneratoren für 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz**

Hydrogeneratoren zur Bahnstromerzeugung werden in Flusslaufwerken (wie z.B. Ruppertswil-Auenstein) und in Speicherwerken (wie z.B. Amsteg) eingesetzt und tragen in Österreich und der Schweiz die Hauptlast der Bahnstromversorgung. Die Bauart, vertikale oder horizontale Welle, und die Nenndrehzahl (77–500 UPM) richten sich nach den gegebenen hydraulischen Verhältnissen. In Speicherwerken ist auch Pumpenbetrieb möglich. Überschussenergie kann damit – wie in den Landesnetzen ebenfalls üblich – zur Spitzenlastdeckung gespeichert werden.

Das Bild 4 zeigt die Maschinenhalle des Kraftwerkes Klosters der Bündner Kraftwerke mit der 10-MVA-Gruppe (500 UPM) zur Speisung der Rhätischen Bahn (RhB). Von hinten nach vorne:

- Alte Wasserturbine mit mechanischen Regeleinrichtungen (Bild 4, a).
- Neuer 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Einphasen-Synchrongenerator (Bild 4, b). Die gefederte Aufhängung des Stators zur Dämpfung der 33-Hz-Leistungspulsationen ist auf beiden Seiten des Statorgehäuses gut zu erkennen.
- Neue Wasserturbine (Bild 4, c) zur Bahnmaschine mit moderner Regelung im Schrank davor (Bild 4, d).

Das Bild 5 zeigt das Prinzipschaltbild eines 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Wasserkraftwerkes.

**Wärmekraftwerke mit Turbogeneratoren für 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz**

Turbogeneratoren zur Bahnstromerzeugung werden vorwiegend in Deutschland in kohle- oder gichtgasbeheizten Kraftwerken sowie in Kernkraftwerken eingesetzt. Bedingt durch das 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Einphasennetz ist die Nenndrehzahl der Turbogruppen 1000 UPM. Das Bild 6 zeigt das Prinzipschaltbild

Anlagentyp	Anzahl	Nennleistung (total)	Baujahre (Inbetriebsetzung)
Hydrogeneratoren ESYM	60	500 MVA	1917–1992
Turbogeneratoren ESYM	8	242 MVA	1930–1965
Rotierende Umformer ESYM	45	1371 MVA	1935–1990
		1085 MW	
Vollstatische Umrichter DASM	2	40 MVA/40 MW	1992–....

Tabelle II Vom Bereich Kraftwerke der ABB in Deutschland, Österreich und der Schweiz ausgelieferte Anlagen

ESYM Einphasen-Synchronmaschinen  
DASM Dreiphasen-Asynchronmaschinen

eines Wärmekraftwerkes zur  $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnstromerzeugung.

### Erregereinrichtungen für die Einphasensynchronmaschinen

Weil Bahnkraftwerke unabhängig vom Landesnetz arbeiten müssen, sind sie auch mit autonom arbeitenden Erregereinrichtungen ausgerüstet. Die älteren Anlagen wurden mit einer Gleichstrom(DC)-Erregermaschine, die von einer permanentpolerregten Hilfsrerregmaschine erregt waren, ausgerüstet. Neue Anlagen werden hingegen mit vollstatischen, einphasigen Nebenschluss-erregungen (NSE) gebaut. Die ersten NSE wurden 1990 bei den drei neuen ESYM des SBB-Kraftwerkes Etzel eingesetzt.

Auch die Umformer sollen bei einem Ausfall des Landesnetzes am Bahnnetz weiterlaufen und dabei als Phasenschieber dienen. Auch sie benötigen daher eine autonome Erregereinrichtung, die grundsätzlich gleich wie bei Hydro- und Turbosätzen aufgebaut ist. Prinzipschaltbilder von Erregereinrichtungen sind in den Bildern 5–7 dargestellt.

### Frequenzelastische Umformer 50–16 $\frac{2}{3}$ Hz

Weil das zentrale  $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnnetz autonom betrieben wird, ist die Bahnnetzfrequenz nicht synchron zur Landesnetzfrequenz. Umformer zur Kupplung von Landesnetz und Bahnnetz müssen daher frequenzelastisch arbeiten und bestehen aus einer Dreiphasenasynchron-(DASM) und einer Einphasensynchronmaschine (ESYM), die auf derselben Welle starr miteinander gekuppelt sind.

Die ersten Umformer für frequenzelastischen Betrieb arbeiten noch mit elektromechanischen Regeleinrichtungen. Die nächste Generation wird mit einer elektronischen Wirk- und Blindstromregelung für die Asynchronmaschine ausgeliefert. Mit dem Fort-

schritt der Halbleitertechnik wird man auch die restlichen elektromechanischen Komponenten der Regeleinrichtung vollständig durch Stromrichter und Elektronik ersetzen.

Die drehzahlunabhängige Regelung von Wirk- und Blindleistung der Schleifringläufer-Asynchronmaschine (DASM) erfolgt bei allen Verfahren durch die Einspeisung eines sinusförmigen, dreiphasigen und schlupffrequenten Rotorstromes, dessen Amplitude und Phasenlage verstellbar sind. Die Wirk- und Blindkomponenten des Rotorstromes werden dabei ebenfalls bei allen Varianten von der übergeordneten Wirk- (WSR) und Blindstromregelung (BSR) vorgegeben. Das Bild 7 zeigt die verschiedenen Systemvarianten frequenzelastischer Umformer:

- Umformer mit Scherbiuskaskade (Drehstromverstärkermaschinen) und Doppeldrehtransformatoren (SDT) oder Steuersynchrongruppe (SSG) zur DASM-Leistungsregelung.
- Umformer mit statischer unter-/übersynchroner Stromrichter-kaskade UÜSK zur Leistungsregelung der DASM.
- Umformer mit Scherbiuskaskade und (Super-)Mini-DUR (S)SMD zur Leistungsregelung der DASM (DUR = Direktumrichter).

### Umformer mit Scherbiuskaskade SDT oder SSG

In diesem Fall wird der Sollwert  $I_F$  des schlupffrequenten, sinusförmigen, dreiphasigen DASM-Rotorstromes  $I_2$  im rotierenden Frequenzwandler (FUK) erzeugt und in Scherbius-/Hintermaschinen (rotierende Verstärkermaschinen) entsprechend verstärkt. Die 50-Hz-Erregerspannung  $U_E$  des FUK ist dreiphasig, sinusförmig sowie in der Amplitude und Phasenlage verstellbar. Der auf der Hauptwelle mitlaufende FUK erzeugt aus  $U_E$  über die Drehzahl eine sinusförmige, schlupffrequente, dreiphasige Erregerspannung  $U_F$ , die in Amplitude und Phasenlage der Erregerspannung  $U_E$  folgt.

Die 50-Hz-FUK-Erregerspannung  $U_E$  wird über Doppeldrehtransformatoren (DT) mit elektromechanischer Regeleinrichtung

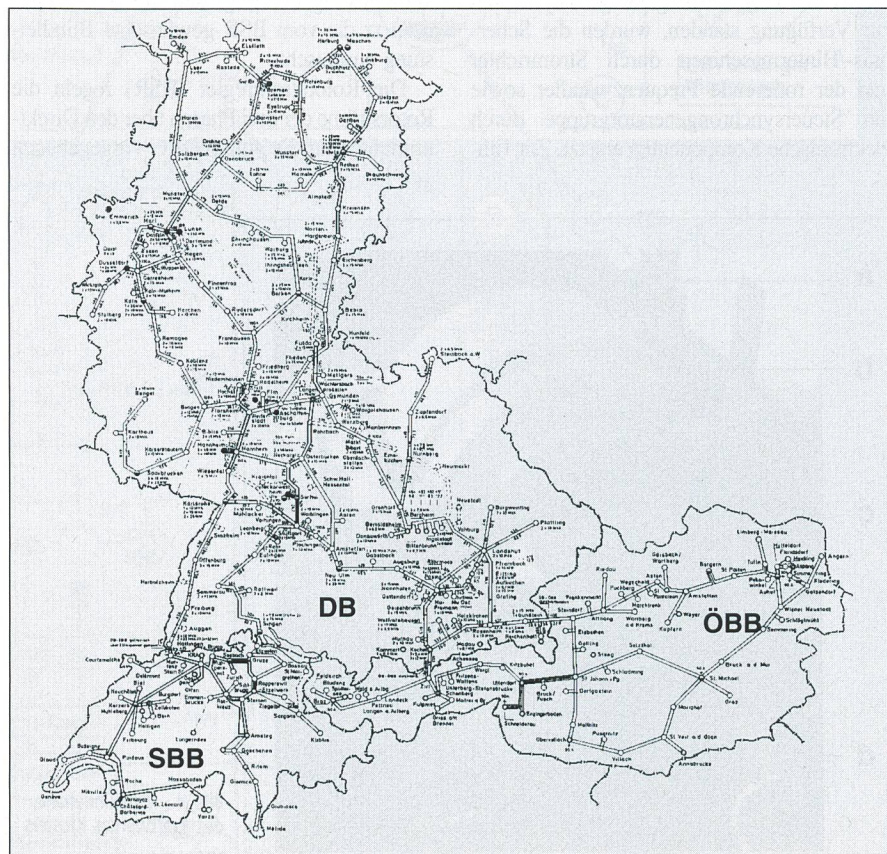
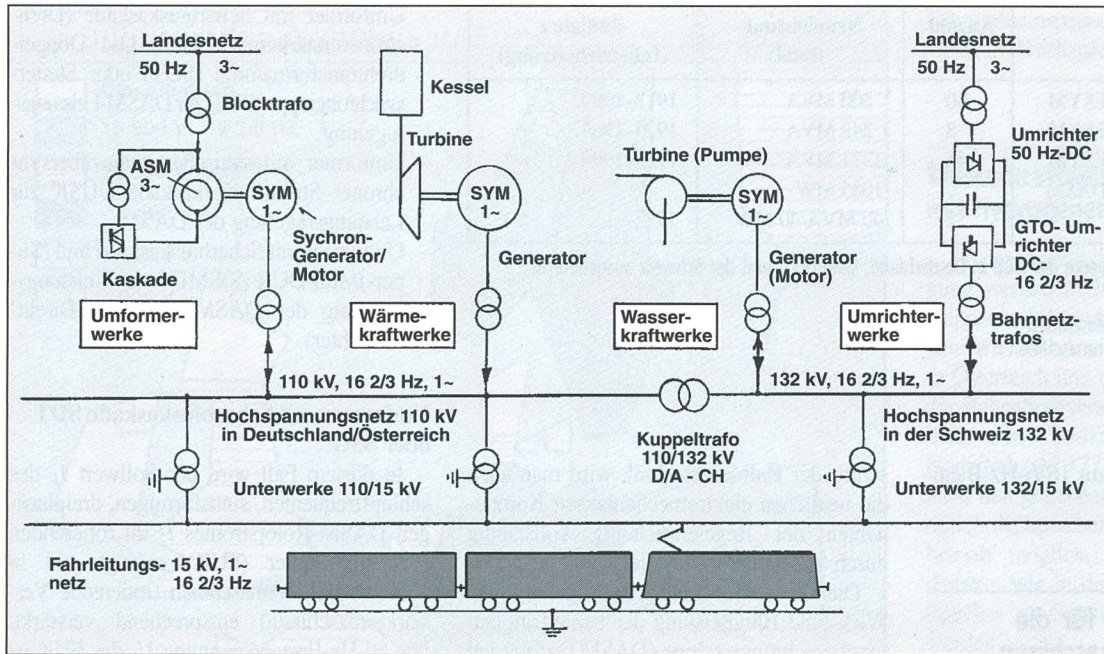


Bild 2 Mitteleuropäisches Bahnstromverbundnetz der DB, ÖBB und SBB



**Bild 3 Bahnstrom-versorgungsanlagen**  
 Verschiedene Bahnstrom-versorgungsanlagen mit deren Fahrdrahrteinspeisung über das bahneigene 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Hochspannungs-netz

oder über eine Steuersynchrongenerator-gruppe (SG) mit elektronischer Regeleinrichtung, die auf zwei um 90° versetzte Erregerwicklungen des Steuersynchrongenerators arbeitet, von der WSR und der BSR vorgegeben.

**Umformer mit statischer unter-/übersynchroner Kaskade (UÜSK)**

Als um 1970 leistungsfähige Thyristoren zur Verfügung standen, wurden die Scherbius-/Hintermaschinen durch Stromrichter und der rotierende Frequenzwandler sowie die Steuersynchrongeneratorgruppe durch elektronische Komponenten ersetzt. Zur Ein-

speisung des Rotorstromes  $I_2$  der Schleifring-anker-Asynchronmaschine wird ein dreiphasiger Direktumrichter eingesetzt. Die Funktion des FUK wird von den Funktionen Rotordrehfeldgeber (RDG) und Rotordrehfeldkomponentengeber (RDKG) übernommen. Die Rotorstrom-Sollwerte werden im RDG-RDKG derart berechnet, dass die Umformergruppe die vom WSR verlangte Wirkleistung überträgt und am 50-Hz-Landesnetz die vom BSR gewünschte Blindleistung austauscht.

Die Rotorstromregler (RSR) regeln die Rotorströme der drei Phasen über den Direktumrichter auf die vom RDKG vorgegebenen

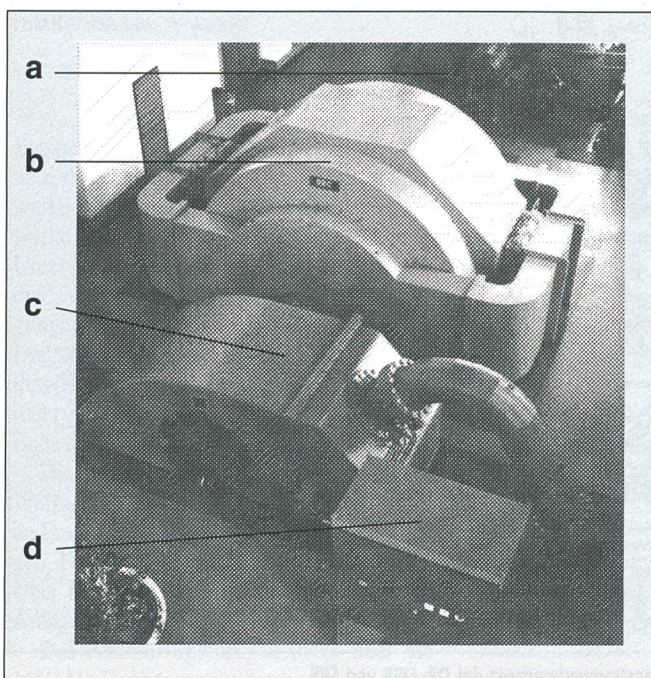
dreiphasigen, schlupffrequenten, sinusförmigen Sollwerte. Eine schnelle Umschaltlogik sorgt für kurze Strompausen der kreisstromfrei betriebenen Direktumrichter.

**Umformer mit Scherbiuskaskade und (Super-)Mini-Direktumrichter**

Nachdem der Aufwand für den Unterhalt der elektromechanischen Regeleinrichtungen älterer Umformer stark zunahm, suchte man nach Ersatzlösungen. Das war die Geburtsstunde der Mini-DUR, kleiner nur für die Erregerleistung der Hauptscherbiusmaschine ausgelegter Direktumrichter, welche über die Erregerstromregelung (ESR) einen schlupffrequenten, sinusförmigen und dreiphasigen Erregerstrom in die Scherbiusmaschine einspeisen. Die Mini-DUR arbeiten also grundsätzlich gleich wie UÜSK, kommen aber mit einem kleinen Direktumrichter aus, weil sie die Hauptscherbiusmaschinen als Leistungsverstärker weiterbenutzen.

Das Bild 8 zeigt die Maschinenhalle des Umformerwerks Kerzers der SBB mit zwei Umformern mit Scherbiuskaskaden. Von hinten nach vorne sind zu sehen:

- Einphasensynchrongenerator (ESYM) (Bild 8, a). Der dahinter angebaute DC-Erregergenerator wird von der ESYM verdeckt. Unter der seitlichen Abdeckung sind die Federpakete zur Dämpfung der 33-Hz-Leistungspulsationen untergebracht.
- Dreiphasenschleifringläufer-Asynchronmaschine DASM (Bild 8, b). Im Kasten davor mit den drei Sichtfenstern sind die Schleifringe untergebracht.
- Hauptscherbiusmaschine HM (Bild 8, c). Die Hilfsscherbiusmaschinen sind im Kel-



**Bild 4 Maschinenhalle des Kraftwerkes Klosters**  
 Nähere Angaben: siehe Text

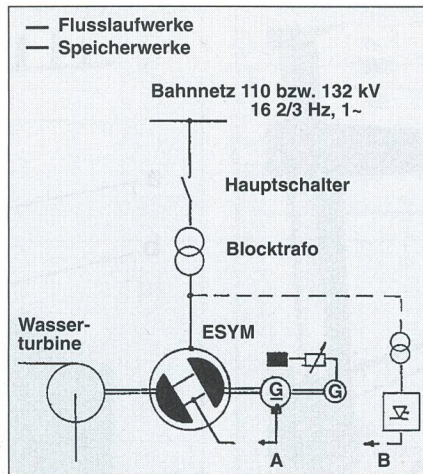
ler untergebracht. Sie werden von einem Asynchronmotor ASM angetrieben.

- Frequenzumformer FUK (Bild 8, d). Die Steuersynchrongeneratorgruppe ist ebenfalls im Keller untergebracht.

Das Bild 9 zeigt die Maschinenhalle des Umformerwerks Seebach der SBB mit zwei Umformern mit statischer unter-/übersynchroner Kaskade. Von hinten nach vorne sind zu sehen:

- Einphasensynchronmaschine (ESYM) (Bild 9, a). Der dahinter angebaute DC-Erregergenerator wird von der ESYM verdeckt. Dank einer neuen radialen Federung zur Dämpfung der 33-Hz-Leistungspulsationen ist die ESYM wesentlich schmaler gebaut.
- Dreiphasenschleifringläufer-Asynchronmaschine DAM (Bild 9, b). Im Kasten davor mit den drei Sichtfenstern sind die Schleifringe untergebracht.

Man beachte die gegenüber einer Scherbiusanlage wesentlich kürzere Bauweise.

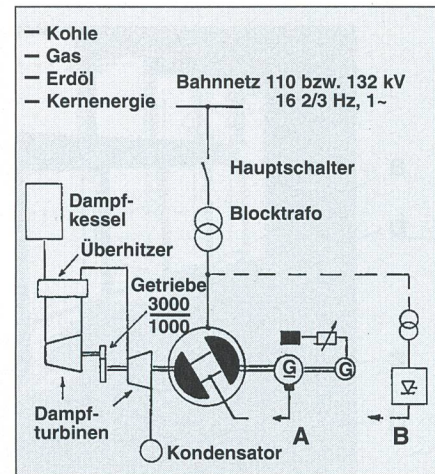


**Bild 5** Prinzipschaltbild eines 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Wasserkraftwerkes

In Speicherkraftwerken sind teilweise auch Pumpen installiert.

Prinzipaltypen von Erregeranlagen:

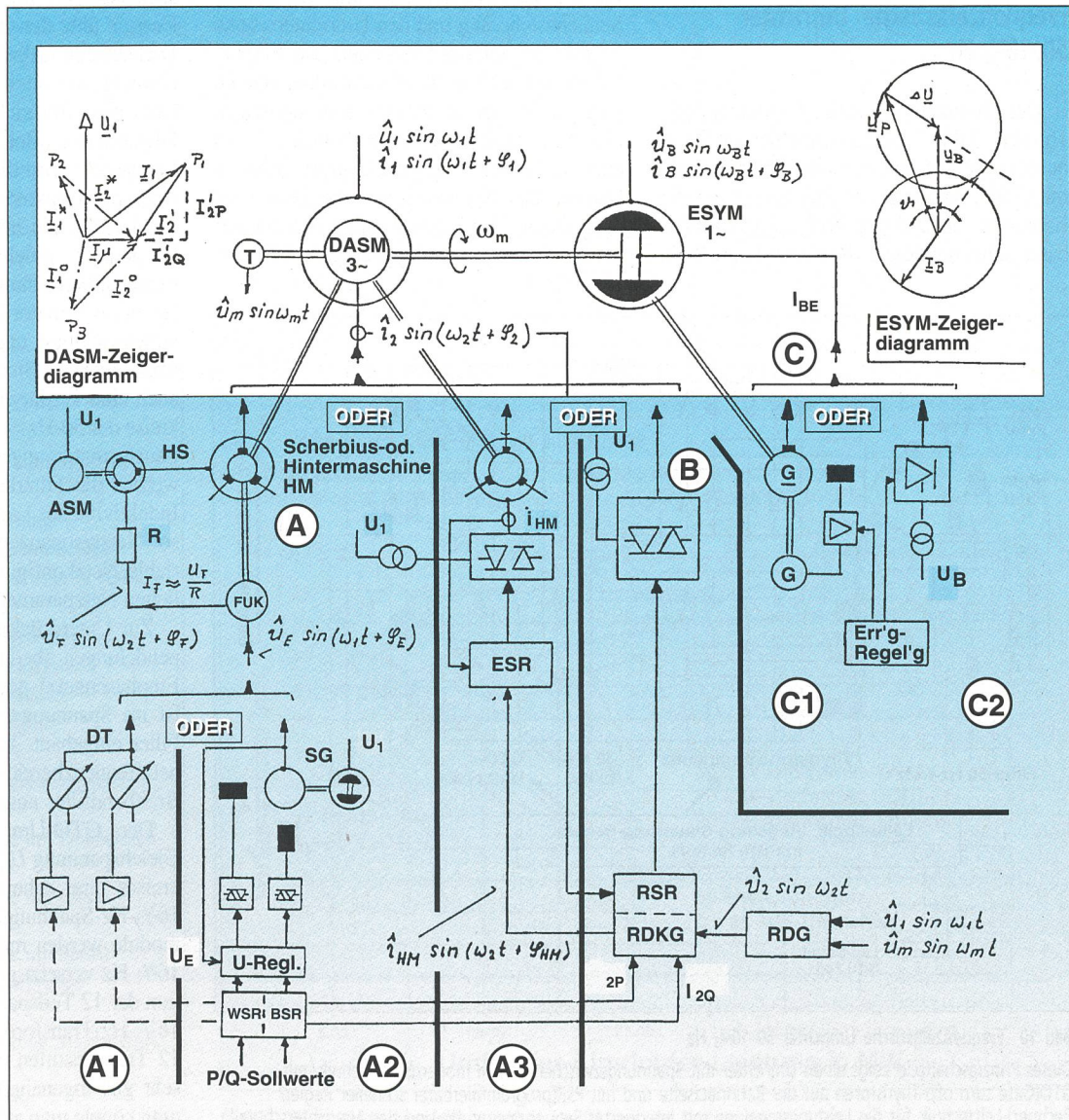
- A Gleichstromhauptschalter und permanent-polarregte Hilfs-erregungsmaschine
- B vollstatische Einphasen-Nebenschluss-erregung (NSE)



**Bild 6** Prinzipschaltbild eines Wärmekraftwerkes zur 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Bahnstromerzeugung

Prinzipaltypen von Erregeranlagen:

- A Gleichstromhauptschalter und permanent-polarregte Hilfs-erregungsmaschine
- B vollstatische Einphasen-Nebenschluss-erregung (NSE)



**Bild 7** Frequenzumformer 50-16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz

Frequenzumformer mit verschiedenen Varianten von Erregeranlagen:

- A Wirk- und Blindleistungsregelung der DAM über Scherbiuskaskaden:
  - A1 mit Doppeldrehtransformer (SDT)
  - A2 mit Steuer-Synchron-Generatorgruppe (SSG)
  - A3 mit (Super)Mini-DUR (SSMD/SMD)
- B Wirk- und Blindleistungsregelung der DAM über statische unter-/übersynchrone Kaskaden (UÜSK)
- C ESYM-Blindleistungs-/Spannungsregelung:
  - C1 mit Erreger-Maschinen (EM)
  - C2 mit vollstatischer Nebenschluss-Erregung (NSE)

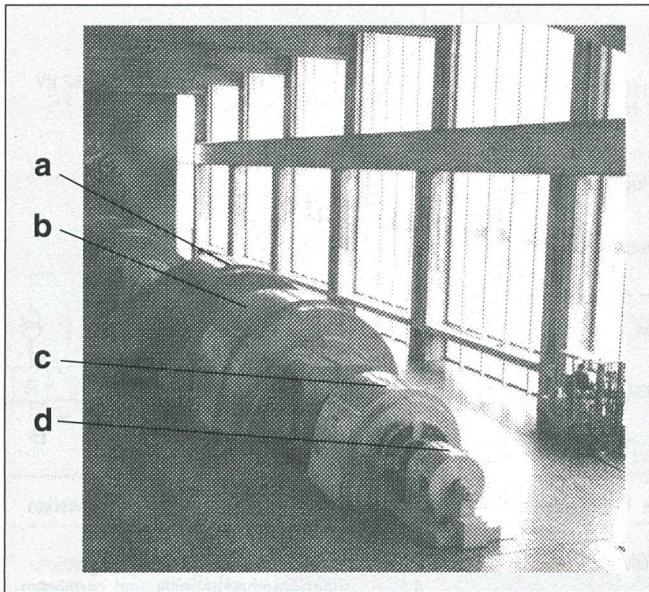


Bild 8 SBB-Umformerwerk Kerzers mit zwei Umformern mit Scherbiuskaskaden  
Nähere Angaben: siehe Text

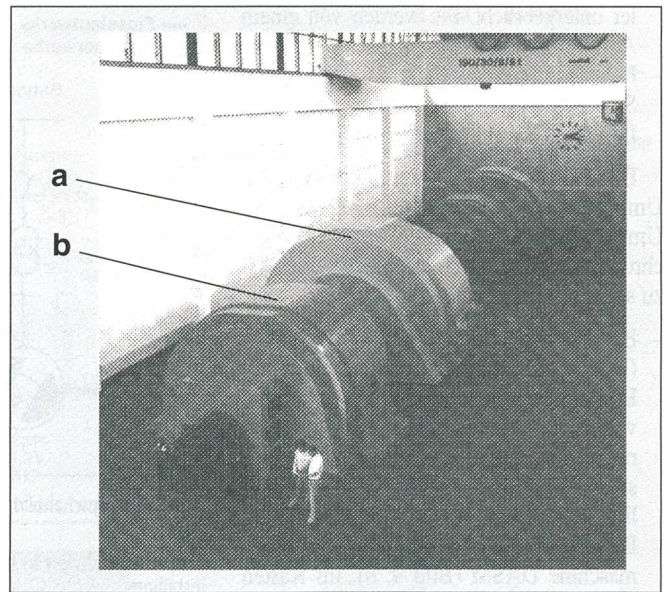


Bild 9 SBB-Umformerwerk Seebach mit zwei Umformern mit statischer unter-/übersynchroner Kaskade  
Nähere Angaben: siehe Text

### Frequenzelastische Umrichter 50-16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz

Der frequenzelastische Umrichter 50-16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz, Bild 10, ist ein Umrichter mit Spannungszwischenkreis in modernster Technik, mit GTO (Gate turn off)-Thyristoren auf der Bahnnetzseite und mit PSR (programmierbarer schneller Regler/Rechner)-Leittechnik

für die Leistungsregelung mit integrierter Sequenzsteuerung und den Umrichterschutz. Weil im zentralen Bahnnetz die Einphasenenergie auch in Bahnkraftwerken erzeugt wird, muss der Umrichter zum optimalen Energieaustausch zwischen beiden Netzen auch in beiden Energierichtungen arbeiten können. Der Spannungszwischenkreis wird über einen 12pulsigen Umkehrstromrichter auf konstante Spannung geregelt. Bei An-

speisung des Bahnnetzes wird dabei die Energie über den Netztransformator und die Drehstrombrücken für die positive Stromrichtung aus dem Landesnetz entnommen. Der Netzstromrichter arbeitet dabei als Gleichrichter. Bei Energierückspeisung ins Landesnetz wird die Energie aus dem Spannungszwischenkreis über die Drehstrombrücken für die negative Stromrichtung ins Landesnetz zurückgespeist. Der Netzstromrichter arbeitet nun als Wechselrichter. Der Netztransformator hat neben der Hochspannungswicklung und den beiden Sekundärwicklungen in Stern- und Dreieckschaltung auch eine Tertiärwicklung, an die die Filterkreise der 50-Hz-Seite und der Hilfsbetriebs-transformator angeschlossen sind. Dadurch werden die Filterkreise über eine definierte Induktivität ans Landesnetz angeschaltet, um so Netzresonanzen, verursacht durch variable Netzkonfigurationen mit unterschiedlichen Netzparametern, zu unterdrücken.

Zur Unterdrückung der 33-Hz-Leistungspendelungen (bedingt durch das 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Einphasennetz) gegenüber dem Landesnetz ist im Spannungszwischenkreis ein 33-Hz-Filter eingebaut. Wegen des grossen Bahnnetzfrequenzbereiches ist dieses Filter als Breitbandfilter auszulegen.

Der GTO-Umrichter erzeugt aus der Gleichspannung  $U_d$  des Spannungszwischenkreises eine nahezu sinus(treppen)-förmige 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Spannung. Die 12 GTO-Teilmodule werden mit der Grundfrequenz von 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz versetzt getaktet, so dass die Addition der 12 Teilspannungen am Ausgang des 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Transformators eine Spannung mit 12 Treppenstufen ergibt, die der Sinusform sehr gut angenähert ist. Diese Art der Taktung könnte man als sinusbewertete Treppen-

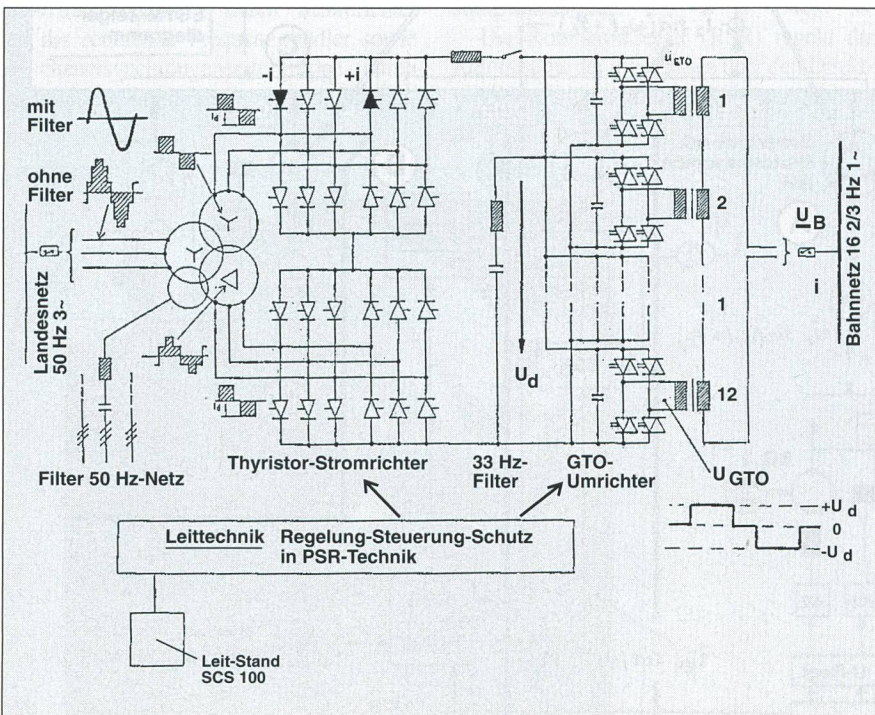


Bild 10 Frequenzelastische Umrichter 50-16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz

Dieses Prinzipschaltbild zeigt einen Umrichter mit Spannungszwischenkreis in modernster Technik, mit GTO(Gate turn off)-Thyristoren auf der Bahnnetzseite und mit PSR(programmierbarer schneller Regler/Rechner)-Leittechnik für die Leistungsregelung mit integrierter Sequenzsteuerung und den Umrichterschutz

kurvenmodulation bezeichnen. Dieses Modulationsverfahren, mit dem die Regeln für elektrische Maschinen bezüglich der Spannungsform voll erfüllt werden können, erlaubt die Ankopplung ans Bahnnetz ohne den Einsatz von Filterkreisen.

Durch die Spannungsteilung über der Trafokurzschlussreaktanz  $X_T$  und der Netzkurzschlussreaktanz  $X_N$  wird die Bahnnetzspannung  $U_B$  am Anschlusspunkt bezüglich der Oberschwingungen, auch im Leerlauf, noch zusätzlich verbessert (Bild 11). Im Ersatzschaltbild und in den beiden Oszillogrammen des Bildes 11 wird davon ausgegangen, dass die Bahnnetz-Ersatzspannung  $U_N$  ideal sinusförmig ist und dass die  $16^{2/3}$ -Hz-Grundschwingung von  $U_{UUR}$  mit dieser identisch ist. Der  $16^{2/3}$ -Hz-Grundschwingungsstrom wird dann Null, und die Anlage befindet sich im Leerlauf, wobei die Spannung  $U_B$  über den Spannungsteiler zwischen  $X_T$  und  $X_N$  und die Oberschwingungsströme gebildet wird.

Wie aus dem Ersatzschaltbild und dem Zeigerdiagramm von Bild 11 ersichtlich ist, verhält sich dieser GTO-Umrichter am Bahnnetz grundsätzlich gleich wie eine Einphasen-Synchronmaschine. Durch die Vorgabe von Amplitude und Phasenlage der Umrichterausgangsspannung  $U_{UUR}$  gegenüber der Bahnnetzspannung  $U_B$  können die Wirk- und die Blindleistung in allen vier Quadranten geregelt werden. Der hier beschriebene vollstatische Umrichter arbeitet damit in allen Betriebsarten, die von frequenzelastischen Umformern bekannt sind. Wie schliesslich der Wirkungsgradvergleich in Bild 12 zeigt,

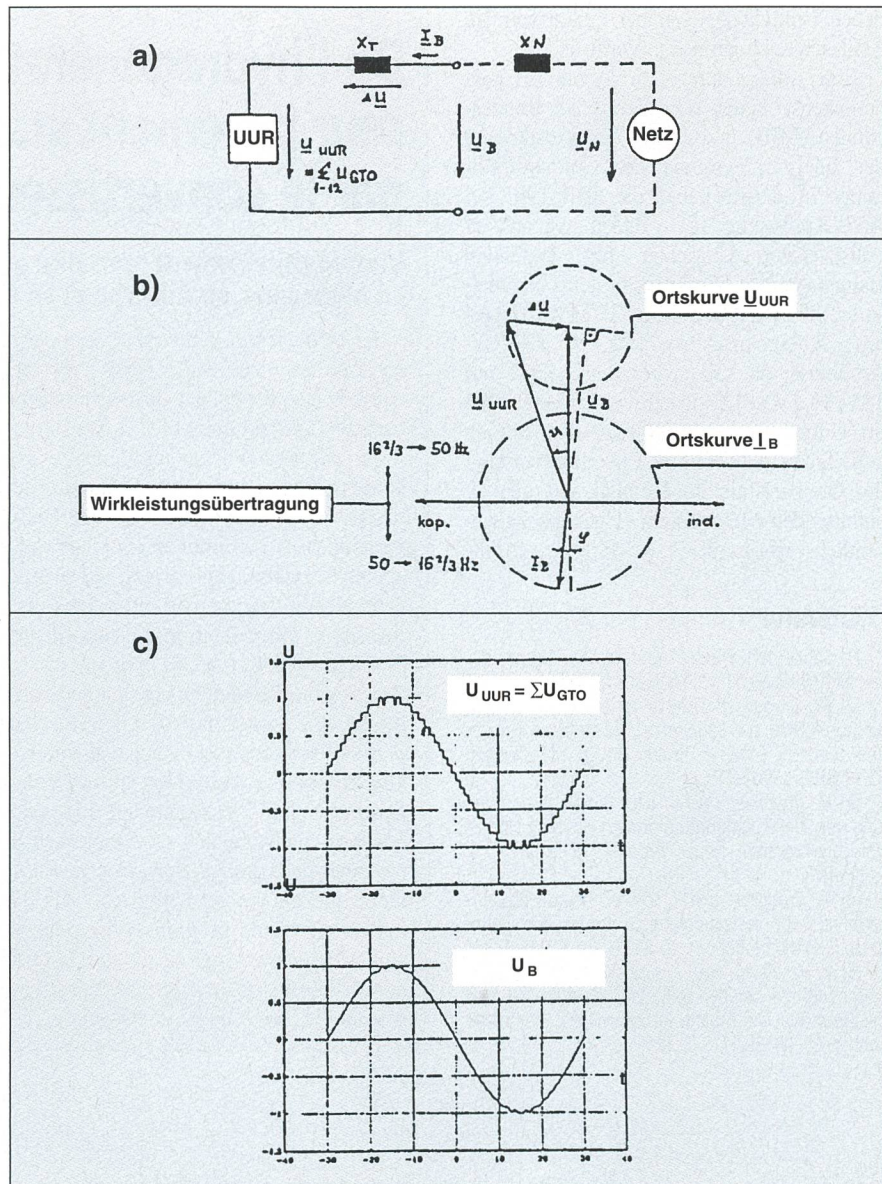


Bild 11 Verhalten eines GTO-Umrichters am Bahnnetz  
 a Ersatzschaltbild      b Zeigerdiagramm  
 c Oszillogramme der Ausgangsspannungen  $U_{UUR}$  und  $U_B$  im Vergleich

**Abkürzungen**

- BSR Blindstromregelung
- DASM Dreiphasenasynchronmaschine
- DUR Direktumrichter
- ESR Erregerstromregelung
- ESYM Einphasensynchronmaschine
- FUK Frequenzumformer (zur Scherbiuskaskade)
- GTO Gate turn off(-Thyristor)
- HM Hauptscherbiusmaschine
- HS Hilfsscherbiusmaschine
- NSE Nebenschlusserregung
- RDG Rotordrehfeldgeber
- RDKG Rotordrehfeldkomponentengeber
- RSR Rotorstromregler
- SDT Scherbiuskaskade mit Doppeldrehtromformatoren
- (S)SMD Scherbiuskaskade mit (Super)-Mini-DUR
- SSG Scherbiuskaskade mit Steuersynchron-generatorgruppe
- UUR U-Umrichter
- UÜSK unter-/übersynchrone Stromrichter-kaskade
- WSR Wirkstromregelung

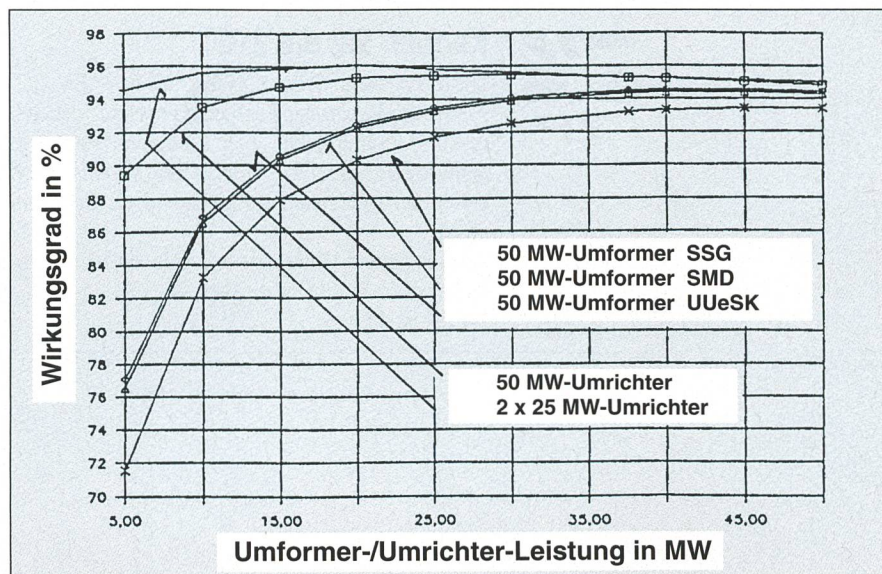


Bild 12 Wirkungsgradvergleich zwischen Umrichtern und Umformern



haben Umrichter gegenüber Umformern im Teillastbereich geringere Verluste.

Eine Anlage der beschriebenen Art geht demnächst bei den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) in Betrieb. Zur Verstärkung der Energieversorgung der Gotthard-Südrampe im Tessin haben die SBB 1991 bei ABB Kraftwerke AG in Baden zwei solcher vollstatischer Umrichter mit folgenden Hauptdaten pro Umrichter bestellt: Nennleistung 20 MVA, kurzzeitig 25 MVA (Überlast), 50-Hz-Anschluss, 150 kV,  $16\frac{2}{3}$ -Hz-Anschluss, 66 kV (später umschaltbar auf 132 kV). Diese Umrichter werden Mitte 1993 im Umformerwerk Giubiasco den Betrieb aufnehmen und damit die Energieversorgung der Gotthardlinie im Hinblick auf den zu erwartenden Mehrverkehr (Huckepack) wesentlich verbessern.

### Literatur

[1] Sonderheft Frequenzumformung. Brown Boveri Mitteilungen 51(1964)8/9, S. 473-518.

[2] W. Bruggisser: Grösste rotierende Netzkupplungsumformer für Bahnnetze. Die Anlagen Kerzers und Seebach, Schweiz. Brown Boveri Mitteilungen 65(1978)11, S. 707-715.

[3] H. Stemmler: Wirk- und Blindleistungsregelung von Netzkupplungsumformern 50- $16\frac{2}{3}$  Hz mit Umrichterkaskade. Neue Technik 1975, Heft 6, S. 215-226.

[4] W. Bruggisser und R. Schäfer: Neues Hochlaufverfahren für Netzkupplungsumformer für Bahnnetze. Elektrische Bahnen eb 85(1987)4, S. 118-123.

[5] W. Harprecht, H.-J. Krauss, M. Uzdil: Der elektrische Betrieb bei der Deutschen Bundesbahn und der Deutschen Reichsbahn im Jahre 1991. Elektrische Bahnen eb 90(1992)1, S. 3-31.

## De l'hydrogénérateur au convertisseur purement statique en passant par le convertisseur rotatif

### L'approvisionnement centralisé en courant de traction $16\frac{2}{3}$ Hz en Allemagne, en Autriche et en Suisse

En même temps que s'est développée la traction ferroviaire électrique en Allemagne, en Autriche et en Suisse, ces pays se sont dotés d'un réseau de traction  $16\frac{2}{3}$  Hz autonome, indépendant du réseau national. Le courant fut d'abord produit dans des centrales hydrauliques, plus tard également dans des centrales thermiques. Depuis 1932, il est possible d'échanger l'énergie avec le réseau national par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence. Aujourd'hui, on fait de plus en plus appel à des solutions basées sur des convertisseurs purement statiques tant pour l'excitation des machines monophasées que pour le couplage des réseaux 50 Hz- $16\frac{2}{3}$  Hz. L'article donne un aperçu des techniques variées, utilisées pour la génération de courant  $16\frac{2}{3}$  Hz. La figure 3 montre le concept des différentes installations d'approvisionnement en courant de traction et l'alimentation de leurs fils de contact par le réseau  $16\frac{2}{3}$  Hz en propre. En Autriche et en Suisse, les hydrogénérateurs assument la majeure partie de la charge de l'approvisionnement en courant de traction (tableau I, fig. 5); en Allemagne, plus de la moitié de l'énergie provient de centrales thermiques (tableau I, fig. 6). Des exigences particulières sont posées aux dispositifs d'excitation des centrales  $16\frac{2}{3}$  Hz, puisqu'elles sont autonomes, autrement dit doivent travailler de manière indépendante du réseau national (fig. 5-7). Le couplage du réseau national et du réseau de traction demande des convertisseurs souples en fréquence; la fig. 7 montre les différentes variantes de systèmes de convertisseurs rotatifs. La fig. 10, finalement, montre un convertisseur en technique de pointe à thyristors GTO (Gate turn off) et télégestion à calculateur/régulateur rapide programmable pour le réglage de la puissance et la protection du convertisseur; comme le montre la comparaison des rendements en fig. 12, de tels convertisseurs présentent, par rapport aux convertisseurs rotatifs, des pertes notablement inférieures en charge partielle.



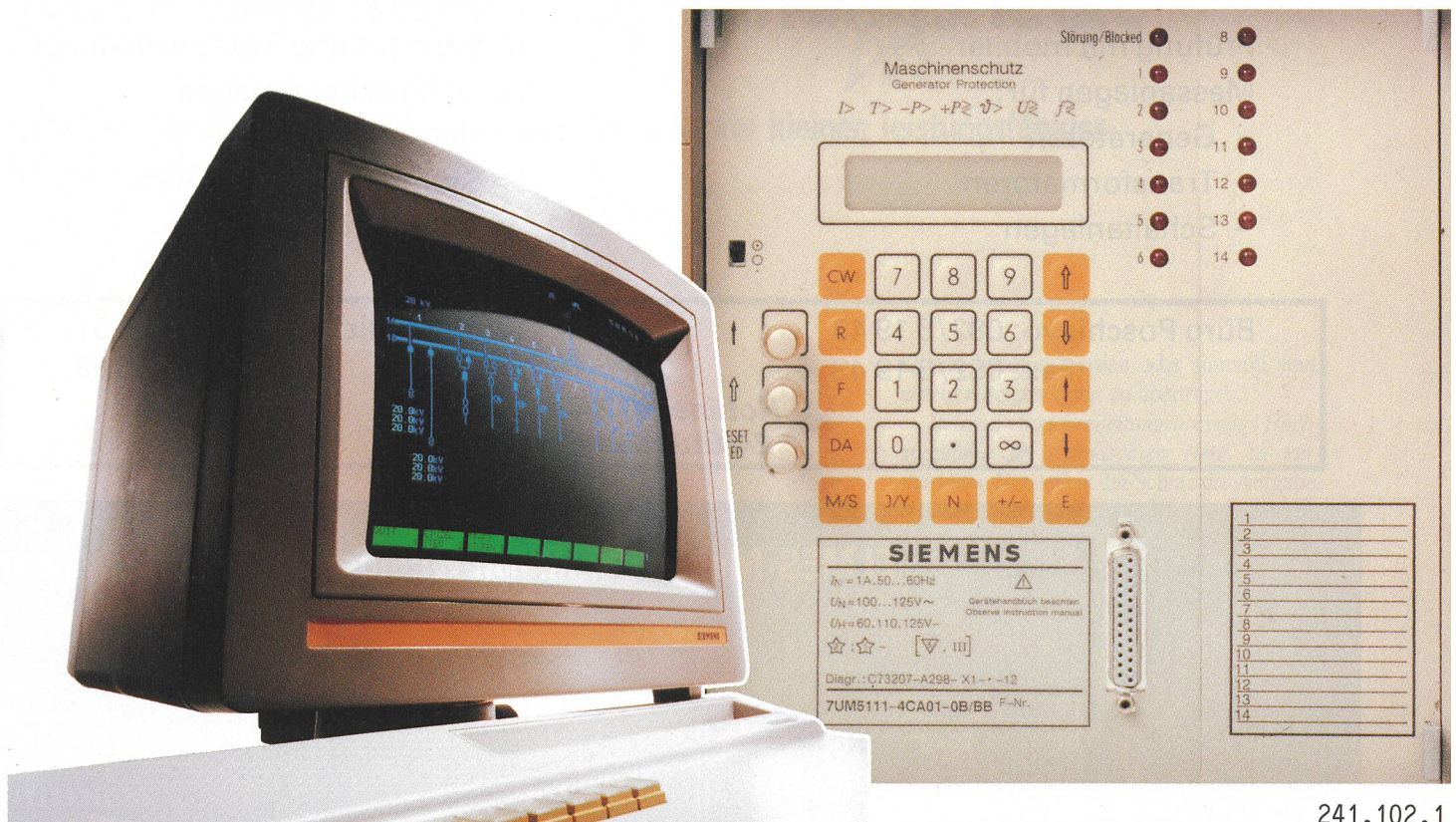
### Kennen Sie die ETG?

Die Energietechnische Gesellschaft des SEV (ETG) ist ein *nationales Forum* zur Behandlung aktueller Probleme der elektrischen Energietechnik im Gesamtrahmen aller Energieformen. Als *Fachgesellschaft des Schweizerischen elektrotechnischen Vereins (SEV)* steht sie allen interessierten Fachleuten und Anwendern aus dem Gebiet der Energietechnik offen.

Auskünfte und Unterlagen erhalten sie beim Schweizerischen Elektrotechnischen Verein, Seefeldstrasse 301, Postfach, 8034 Zürich, Telefon 01/384 91 11.

# SIEMENS

## Der erste Schritt zur modernsten Leittechnik für Schaltanlagen



241.102.1

Der mikroprozessorgeführte Selektivschutz 7S besteht aus Stationsschutz, Abzweigschutz und Maschinenschutz. Der Stationsschutz mit dezentralen und zentralen Intelligenzen sorgt für Sammelschienen- und Schaltversagerschutz. Der Abzweigschutz verfügt neben der Basisfunktion Distanzschutz über die Zusatzfunktionen Wiedereinschalten, Fehlerortung, Erfassen/Speichern von Kurzschlussdaten und Betriebsmessung.

Der Selektivschutz 7S gehört, zusammen mit den zwei Bausteinen Schaltanlagen-Leitsystem und Schaltfehlerschutz, zum neuesten Leittechnik-System LSA 678. Diese Bausteine können autark oder als komplettes System in beliebiger Kombination betrieben werden. Auf Feld- genauso wie auf Stationsebene. Der Ersatz alter Systeme kann schrittweise erfolgen.

Die zahlreichen Vorteile der neuen Siemens-Leittechnik für die Energieversorgung finden Sie in der ausführlichen Dokumentation. Rufen Sie einfach an.

Siemens-Albis AG  
Energieversorgung

8047 Zürich  
Freilagerstr. 28  
Tel. 01/495 35 66

1020 Renens  
Avenue des Baumettes  
Tel. 021 631 81 11

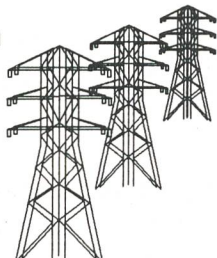
6934 Bioggio  
Centro Nord/Sud 2  
Tel. 091/59 10 84



# ZIMMERLI ENERGIETECHNIK

## Schutzsysteme

- ▷ Analysen
- ▷ Zustandsaufnahmen
- ▷ Einstellungen
- ▷ Inbetriebsetzung
  
- ▷ Prüfung mit mobiler Messanlagen für:
  - Generatoren
  - Transformatoren
  - Schaltanlagen



## Dienstleistungen

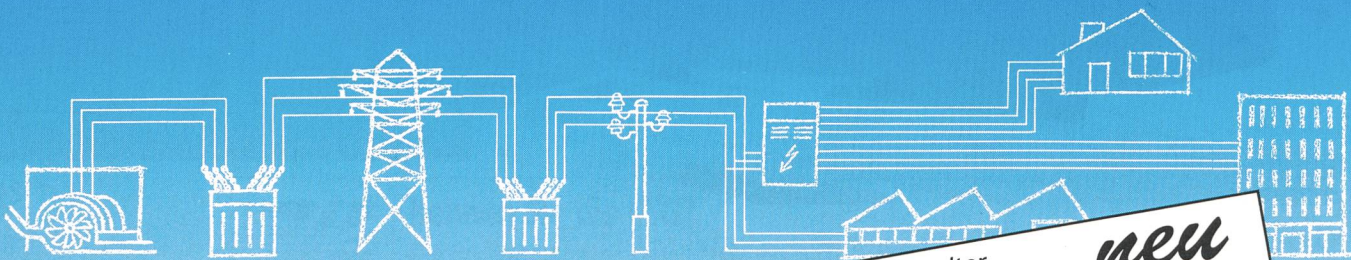
- ▷ Projektleitung
- ▷ Projektierung
- ▷ Beratung
- ▷ Bewertung/Expertisen
- ▷ Machbarkeitsstudien
- ▷ Bestimmung Restlebensdauer technischer Anlagen
- ▷ Netzanalysen
- ▷ Störanalysen
- ▷ Alternativenergien

Büro Poschiavo: 082/5 19 43  
Fax: 082/5 19 43

Büro Mühlethal: 062/51 69 51  
Fax: 062/51 60 68

**Hotline: 077/47 07 80**  
**24-Stunden-Service**

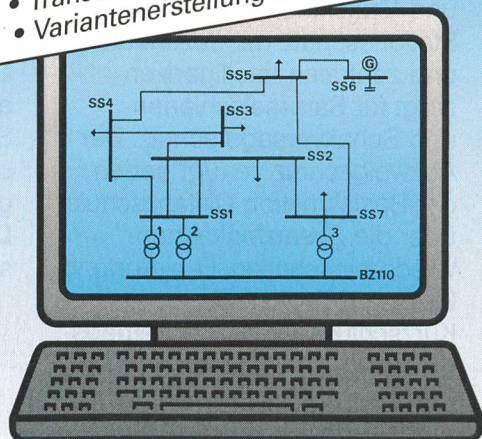
## ELMES-Messtechnik: Mit weniger Daten mehr wissen.



### Wie berechnen Sie Lastfluss und Kurzschluss-Ströme?

Die Software **ELMES NEPS 4.0 G** hilft Ihnen, beim Lastfluss, bei Kurzschlussberechnungen und bei **Staffelplänen für den Distanzschutz** die richtigen Entscheidungen zu treffen. Rufen Sie an, wir dokumentieren Sie gerne.

- neu*
- Schalter
  - 500 Knoten
  - Leitungen mit verschiedenen Leitungstypen
  - Transformatorenbibliothek
  - Variantenerstellung aus Grafik



**LEM Elmes AG**  
Systeme für die Messtechnik  
CH-8805 **Richterswil**  
Telefon (...41) 01-784 22 22  
Fax (...41) 01-784 64 07