

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:	84 (1993)
Heft:	11
Artikel:	Vom Hydrogenerator über rotierende Umformer zum vollstatischen Umrichter : die zentrale 16 2/3-Hz-Bahnstromversorgung in Deutschland, Österreich und der Schweiz
Autor:	Schäfer, René
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-902699

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: 19.01.2026

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

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-Bahnnetzkupplungen 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 Fahrdrähten 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 Bahntraktionssysteme 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 Fahrdrähte

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–Scuol (RhB Rhätische Bahn, Schweiz)
1921	Erstfeld–Biasca (SBB Gotthardbahn, Schweiz)
1923	Kiruna–Narvik (Lappland-Bahn in Schweden/Norwegen)
1925	Arlbergbahn (ÖBB, Österreich)

Erzeugung elektrischer Energie

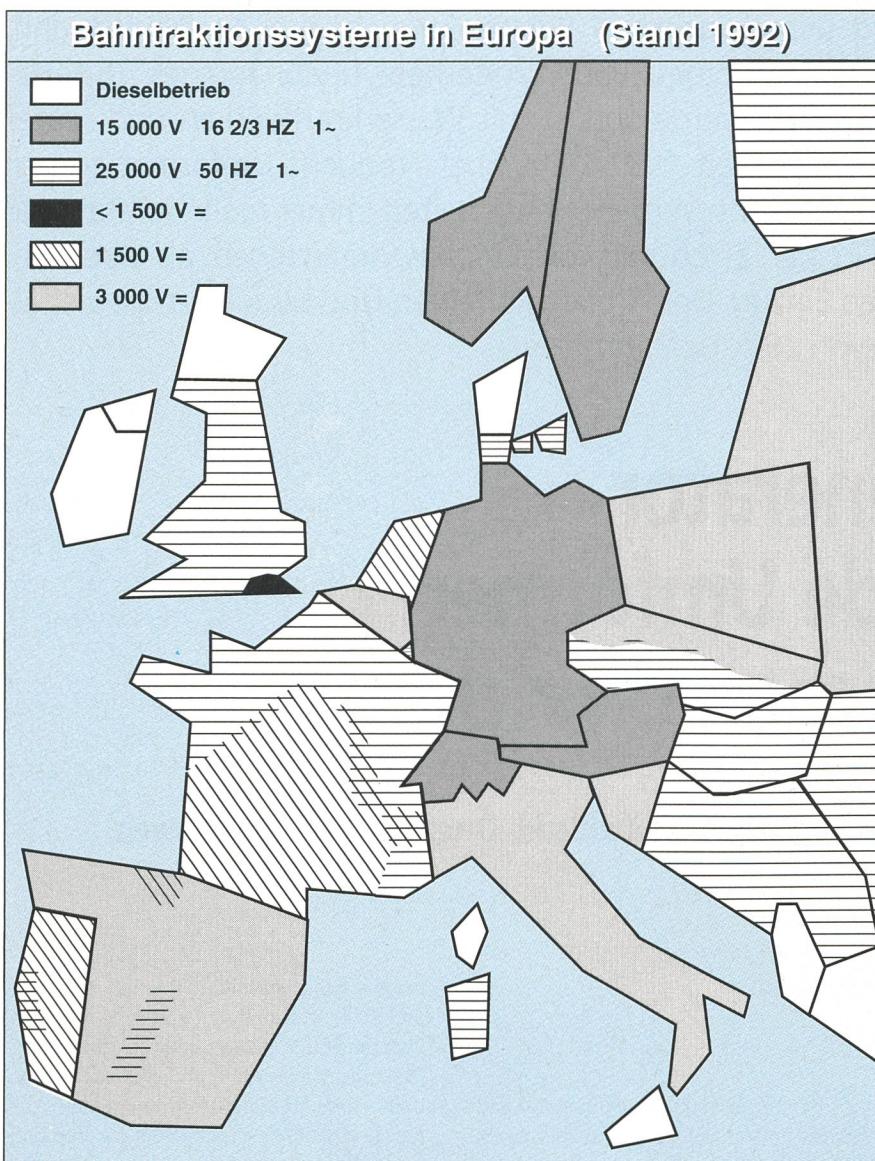


Bild 1 Übersicht über die in Europa verwendeten Traktionssysteme

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 $\frac{2}{3}$ -Hz-Kraftwerke und die Umformer- und Umrichterwerke miteinander verbindet, erfolgt über Unterwerke (16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Trafostationen). Um die vorhandenen 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Energieerzeugungsanlagen noch besser zu nutzen, bauen Deutschland, Österreich und die Schweiz ihre Hochspannungsnetze zudem mehr und mehr zu einem mitteleuropäischen 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnstromverbundnetz zusammen (Bild 2).

Die 16 $\frac{2}{3}$ -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 $\frac{2}{3}$ -Hz-Hochspannungsverbundnetz bietet

bezüglich Wirtschaftlichkeit, Verfügbarkeit und Spitzenlastabdeckung optimale Verhältnisse. Die Bauleistungen der 16 $\frac{2}{3}$ -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

Fahr draht einspeisung über das bahneigene 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Hochspannungsnetz.

Wasserkraftwerke mit Hydrogeneratoren für 16 $\frac{2}{3}$ Hz

Hydrogeneratoren zur Bahnstromerzeugung werden in Flusslaufwerken (wie z.B. Rapperswil-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 Kraftwerks 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 Regel einrichtungen (Bild 4, a).
- Neuer 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Einphasen-Synchrongenerator (Bild 4, b). Die gefederte Auf hängung des Stators zur Dämpfung der 33-Hz-Leistungspulsationen ist auf beiden Seiten des Statorgehäuses gut zu erkennen.
- Neue Wasserturbine (Bild 4, c) zur Bahn maschine mit moderner Regelung im Schrank davor (Bild 4, d).

Das Bild 5 zeigt das Prinzipschaltbild eines 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Wasserkraftwerkes.

Wärmekraftwerke mit Turbogeneratoren für 16 $\frac{2}{3}$ Hz

Turbogeneratoren zur Bahnstromerzeugung werden vorwiegend in Deutschland in kohle- oder gichtgasbeheizten Kraftwerken sowie in Kernkraftwerken eingesetzt. Bedingt durch das 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Einphasennetz ist die Nenndrehzahl der Turbogruppen 1000 UPM. Das Bild 6 zeigt das Prinzipschaltbild

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 $\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnenergie

Anlagentyp	Anzahl	Nennleistung (total)	Baujahre (Inbetriebsetzung)
Hydrogeneratoren	ESYM	60	500 MVA
Turbogeneratoren	ESYM	8	242 MVA
Rotierende Umformer	ESYM	45	1371 MVA
	DASM		1085 MW
Vollstatische Umrichter		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 permanentpolerreigerten Hilfserregermaschine erregt waren, ausgerüstet. Neue Anlagen werden hingegen mit vollstatischen, einphasigen Nebenschlusserregerungen (NSE) gebaut. Die ersten NSE wurden 1990 bei den drei neuen ESYM des SBB-Kraftwerk Etsel 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 $5-16\frac{2}{3}$ 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 Doppel-drehtransformatoren (SDT) oder Steuer-synchrongruppe (SSG) zur DASM-Leistungsregelung.
- Umformer mit statischer unter-/übersynchroner Stromrichterkaskade 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, schlupffreie, dreiphasige Erregerspannung U_F , die in Amplitude und Phasenlage der Erregerspannung U_E folgt.

Die 50-Hz-FUK-Erregerspannung U_E wird über Doppel-drehtransformatoren (DT) mit elektromechanischer Regeleinrichtung

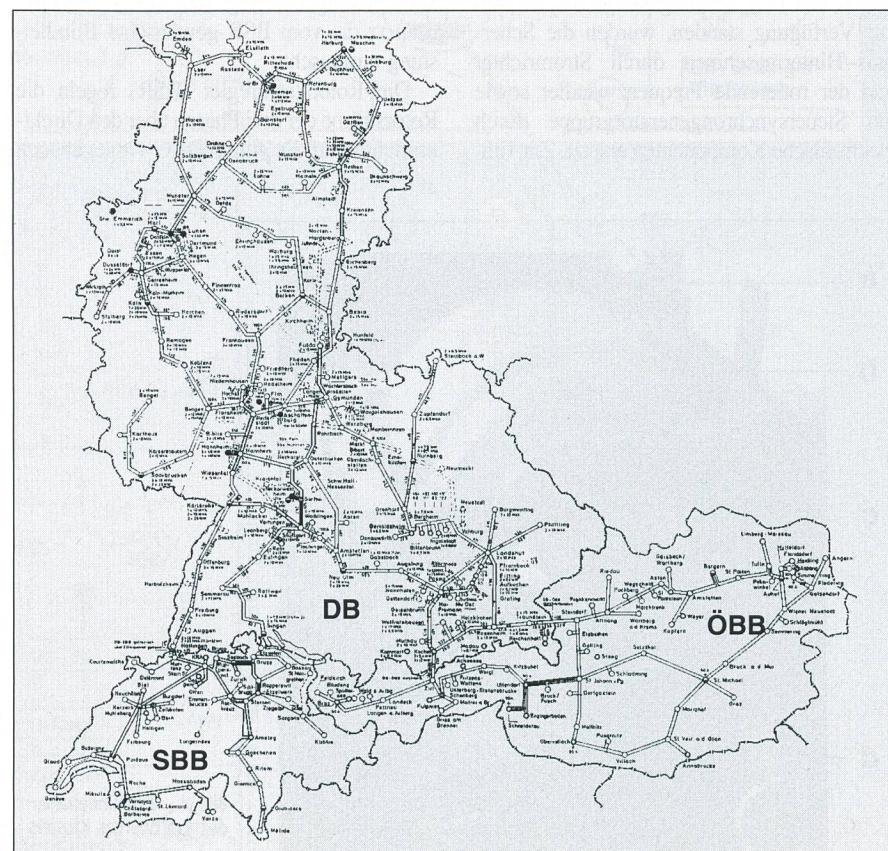


Bild 2 Mitteleuropäisches Bahnstromverbundnetz der DB, ÖBB und SBB

Erzeugung elektrischer Energie

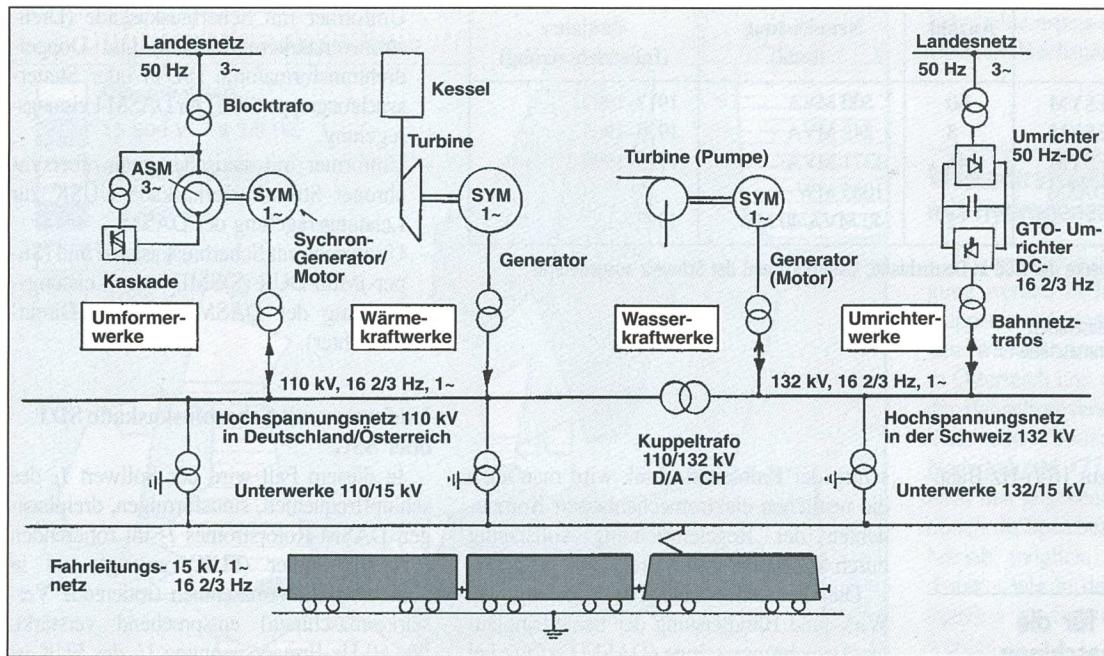


Bild 3 Bahnstromversorgungsanlagen

Verschiedene Bahnstromversorgungsanlagen mit deren Fahrdrahteinspeisung über das bahneigene $16\frac{2}{3}$ -Hz-Hochspannungsnetz

oder über eine Steuersynchrongeneratorgruppe (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 Schleifringanker-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:

- Einphasensynchronmaschine (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 Hilfscherbiusmaschinen sind im Kel-

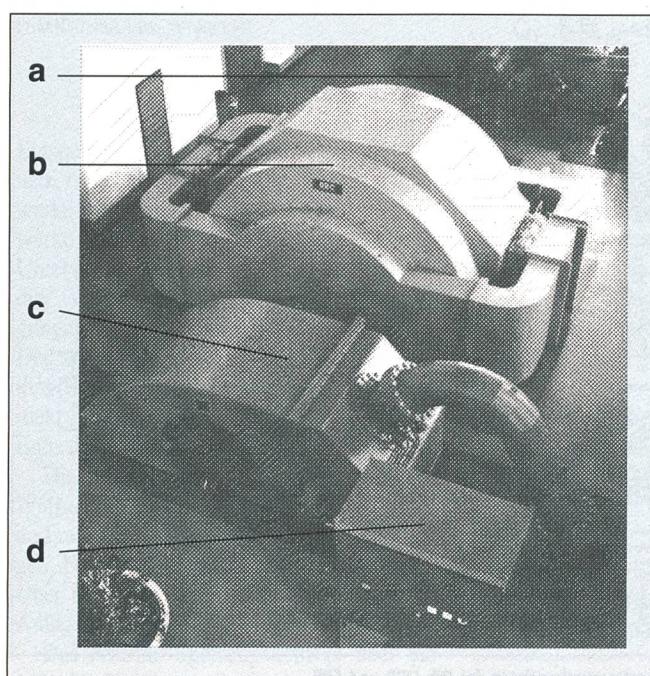


Bild 4 Maschinenhalle des Kraftwerk Klosters
Nähre Angaben: siehe Text

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 Fedierung zur Dämpfung der 33-Hz-Leistungspulsationen ist die ESYM wesentlich schmäler gebaut.
- Dreiphasenschleifringläufer-Asynchronmaschine DASM (Bild 9, b). Im Kasten davor mit den drei Sichtfenstern sind die Schleifringe untergebracht.

Man beachte die gegenüber einer Scherbius-anlage wesentlich kürzere Bauweise.

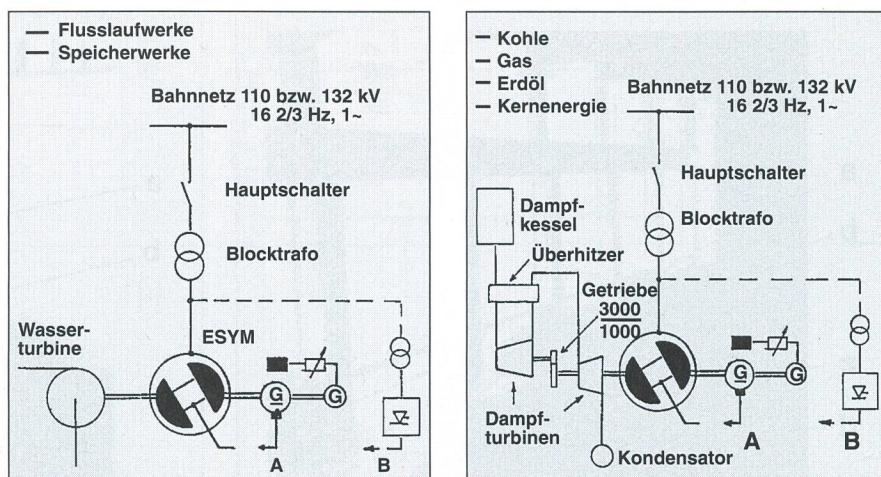


Bild 5 Prinzipschaltbild eines 16 2/3-Hz-Wasserwerkswesens

In Speicherwerkswen sind teilweise auch Pumpen installiert.

Prinzipschaltbilder von Erregereinrichtungen:

A Gleichstromhauptregler und permanenten polregte Hilfserregermaschine

B vollstatische Einphasen-Nebenschluss-erregung (NSE)

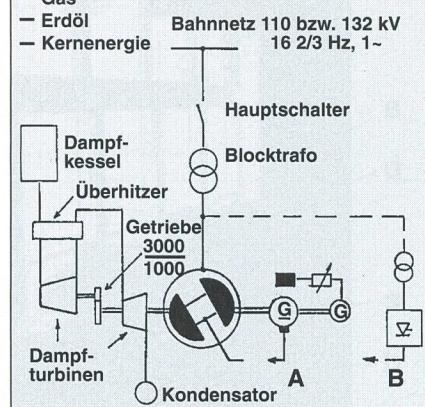


Bild 6 Prinzipschaltbild eines Wärmekraftwerkswesens zur 16 2/3-Hz-Bahnstromerzeugung

Prinzipschaltbilder von Erregereinrichtungen:

A Gleichstromhauptregler und permanenten polregte Hilfserregermaschine

B vollstatische Einphasen-Nebenschluss-erregung (NSE)

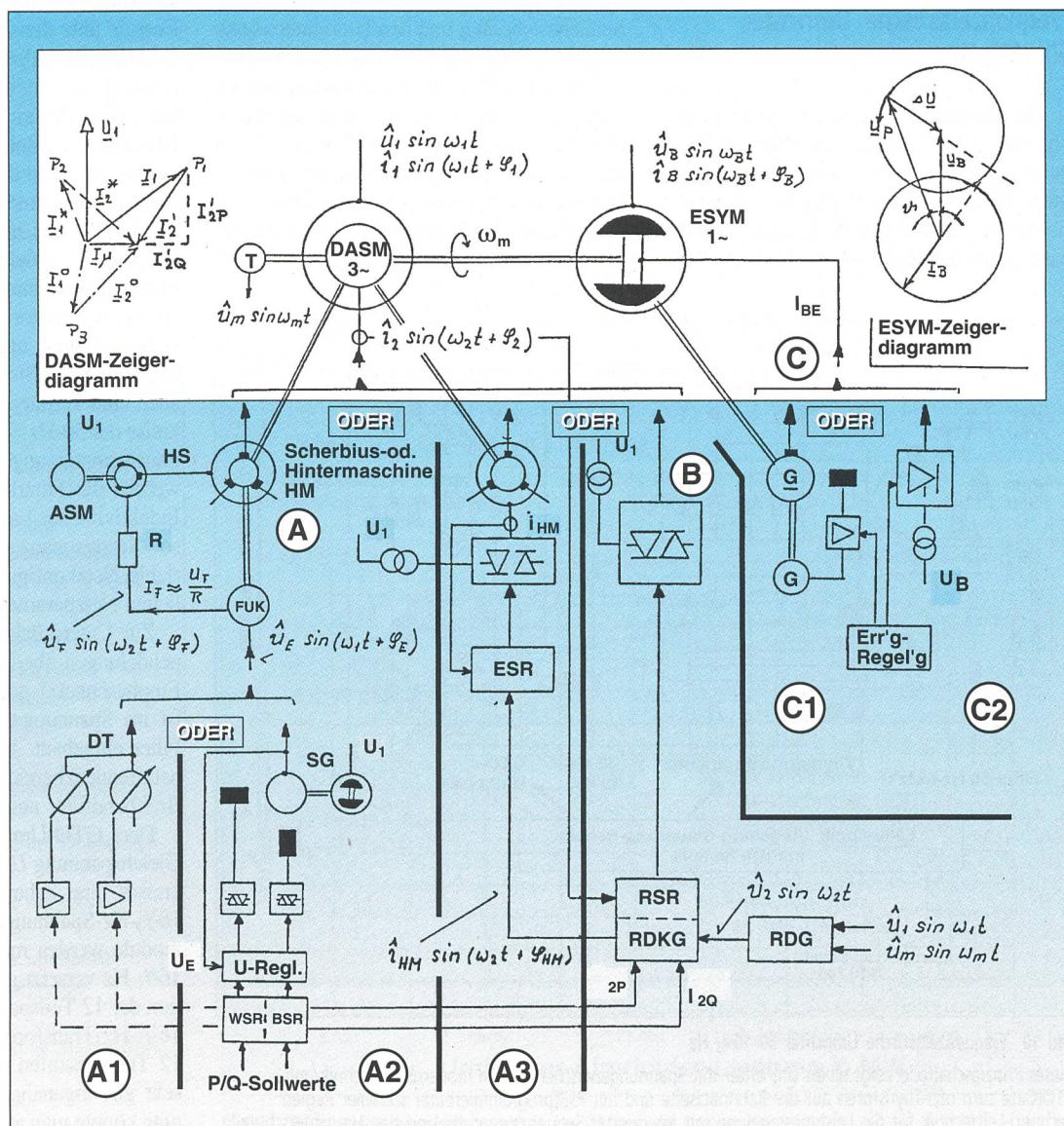


Bild 7 Frequenzumformer 50-16 2/3 Hz

Frequenzumformer mit verschiedenen Varianten von Erregereinrichtungen
A Wirk- und Blindleistungsregelung der DASM über Scherbiuskaskaden:

A1 mit Doppelderehtransformer (SDT)

A2 mit Steuer-Synchron-Generatorgruppe (SSG)

A3 mit (Super)Mini-DUR (SSMD/SMD)

B Wirk- und Blindleistungsregelung der DASM über statische unter-/übersynchrone Kaskaden (UÜSK)

C ESYM-Blindleistungs-/Spannungsregelung;

C1 mit Erreger-Maschinen (EM)

C2 mit vollstatischer Nebenschluss-erregung (NSE)

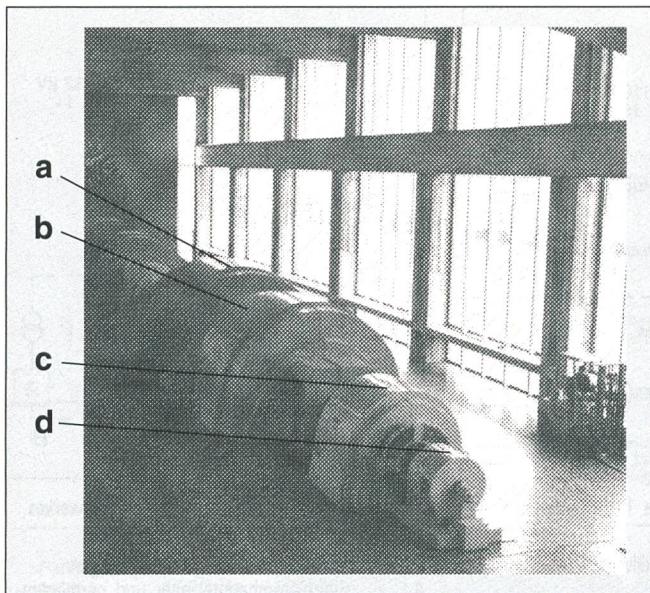


Bild 8 SBB-Umformerwerk Kerzers mit zwei Umformern mit Scherbiuskaskaden
Nähre Angaben: siehe Text

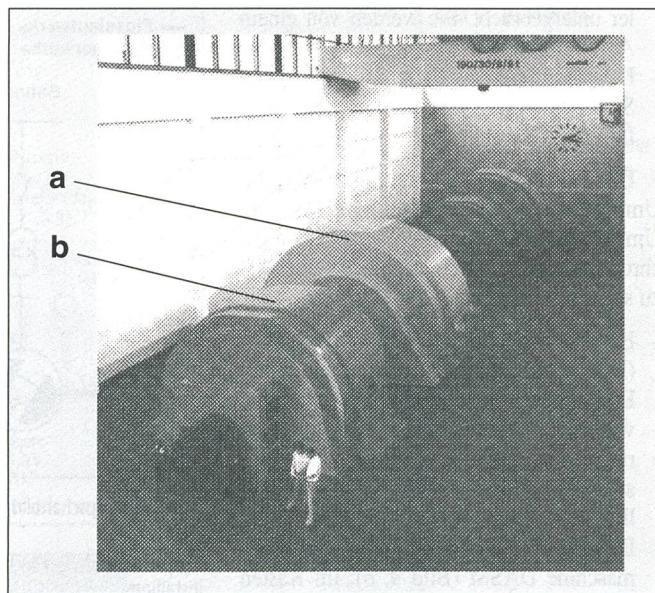


Bild 9 SBB-Umformerwerk Seebach mit zwei Umformern mit statischer unter-/übersynchroner Kaskade
Nähre Angaben: siehe Text

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

Der frequenzelastische Umrichter 50–16 $\frac{2}{3}$ Hz, Bild 10, ist ein Umrichter mit Spannungzwischenkreis in modernster Technik, mit GTO (Gate turn off)-Thyristoren auf der Bahnnetzseite und mit PSR (programmierbar 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 Spannungzwischenkreis 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 Energierückspieisung ins Landesnetz wird die Energie aus dem Spannungzwischenkreis 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 Hilfsbetriebstransformator 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-Leistungs pendelungen (bedingt durch das 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Einphasennetz) gegenüber dem Landesnetz ist im Spannungzwischenkreis ein 33-Hz-Filter eingebaut. Wegen des grossen Bahn netzfrequenzbereiches ist dieses Filter als Breitbandfilter auszulegen.

Der GTO-Umrichter erzeugt aus der Gleichspannung U_d des Spannungzwischen kreises eine nahezu sinus(treppen)-förmige 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Spannung. Die 12 GTO-Teil module werden mit der Grundfrequenz von 16 $\frac{2}{3}$ Hz versetzt getaktet, so dass die Addition der 12 Teilspannungen am Ausgang des 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Transformators eine Spannung mit 12 Treppenstufen ergibt, die der Sinusform sehr gut angenähert ist. Diese Art der Taktung könnte man als sinusbewertete Treppen

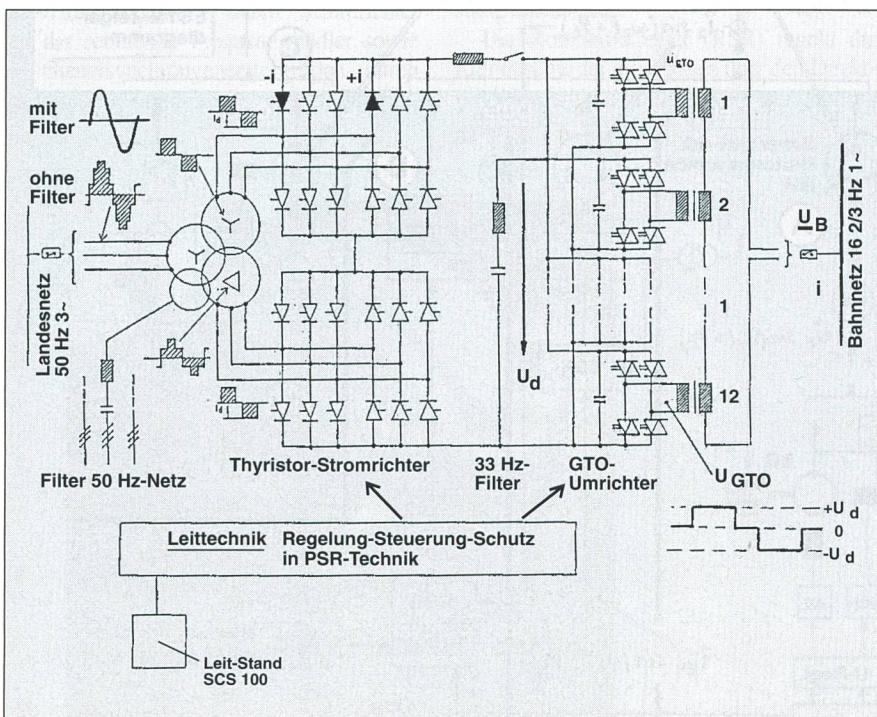


Bild 10 Frequenzelastische Umrichter 50–16 $\frac{2}{3}$ Hz

Dieses Prinzipschaltbild zeigt einen Umrichter mit Spannungzwischenkreis in modernster Technik, mit GTO(Gate turn off)-Thyristoren auf der Bahnnetzseite und mit PSR(programmierbar 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 $16\frac{2}{3}$ -Hz-Grundschwingung von U_{UUR} mit dieser identisch ist. Der $16\frac{2}{3}$ -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,

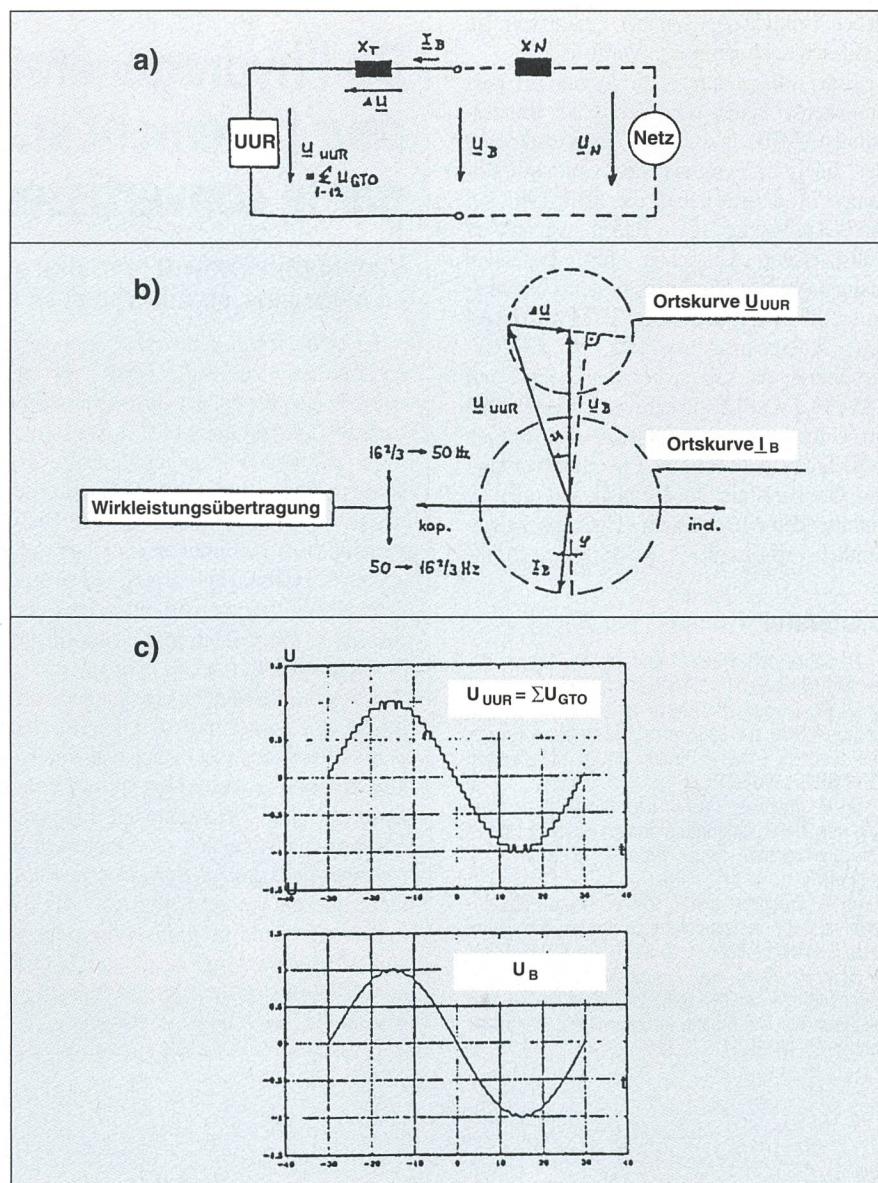


Bild 11 Verhalten eines GTO-Umrichters am Bahnnetz

- a Ersatzschaltbild
- b Zeigerdiagramm
- c Oszillogramme der Ausgangsspannungen U_{UUR} und U_B im Vergleich

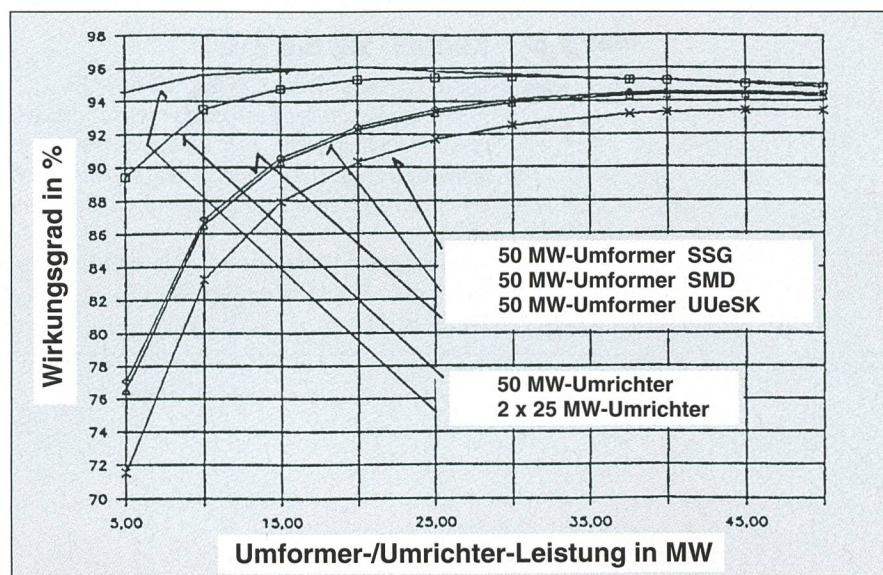


Bild 12 Wirkungsgradvergleich zwischen Umrichtern und Umformern

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.

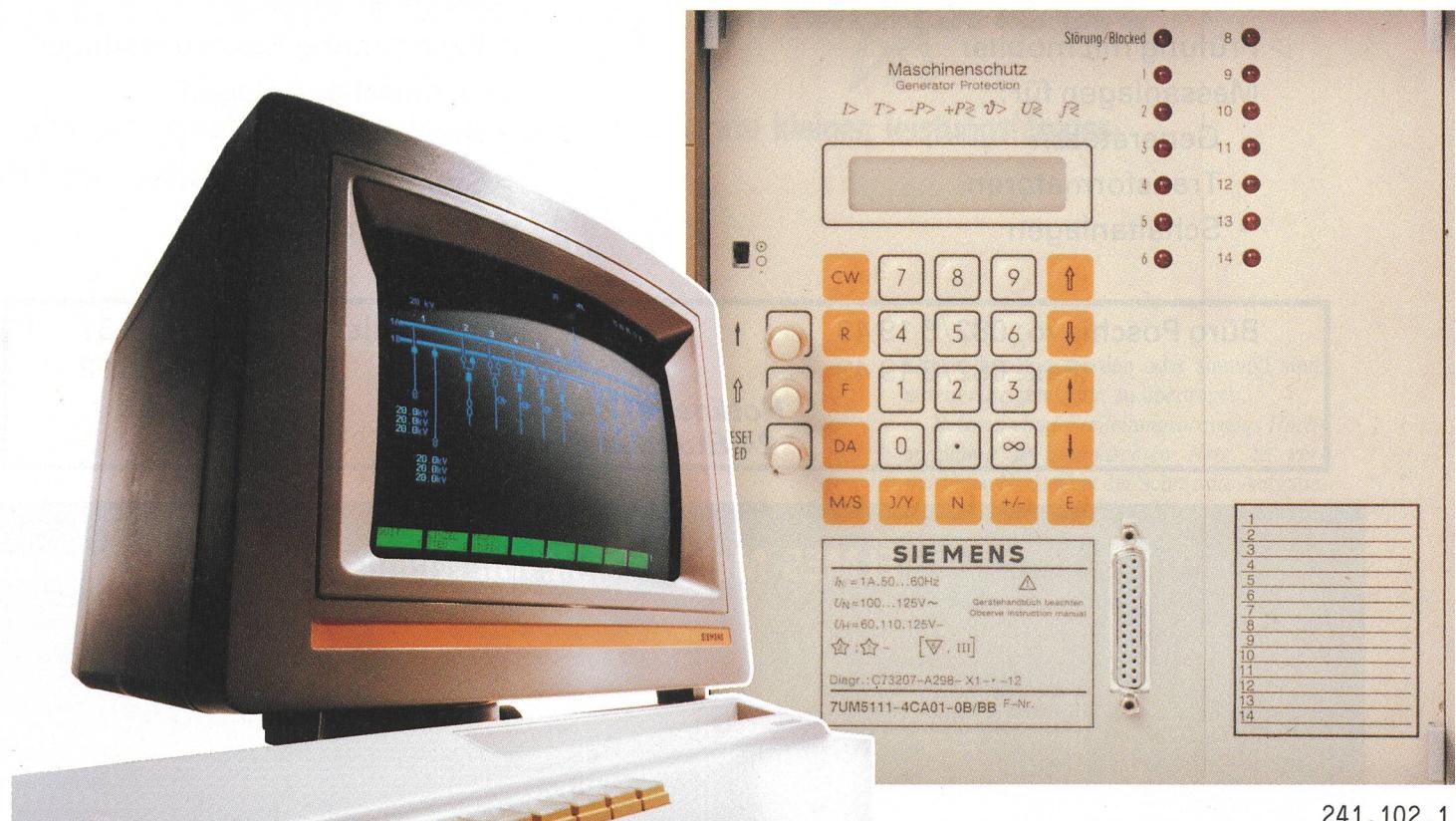


Kennen Sie die ETG?

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.

Der erste Schritt zur modernsten Leittechnik für Schaltanlagen



241.102.1

Der mikroprozessorgeführte Selektivschutz 7S besteht aus Stationsschutz, Abzweigsschutz und Maschinenschutz. Der Stationsschutz mit dezentralen und zentralen Intelligenzen sorgt für Sammelschienen- und Schaltversagerschutz. Der Abzweigsschutz 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

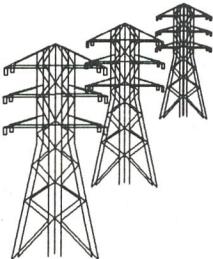
6934 Bioggio
Centro Nord/Sud 2
Tel. 091/5910 84



ZIMMERLI ENERGietechnik

Schutzsysteme

- ▷ Analysen
- ▷ Zustandsaufnahmen
- ▷ Einstellungen
- ▷ Inbetriebsetzung



- ▷ Prüfung mit mobiler Messanlagen für:
 - Generatoren
 - Transformatoren
 - Schaltanlagen

Dienstleistungen

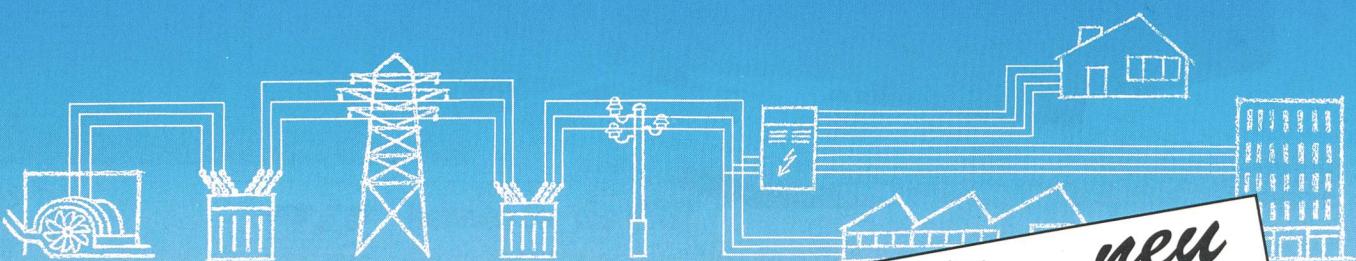
- ▷ Projektleitung
- ▷ Projektierung
- ▷ Beratung
- ▷ Bewertung/Expertisen
- ▷ Machbarkeitsstudien
- ▷ Bestimmung Restlebensdauer technischer Anlagen
- ▷ Netzanalysen
- ▷ Störanalysen
- ▷ Alternativenergien

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.

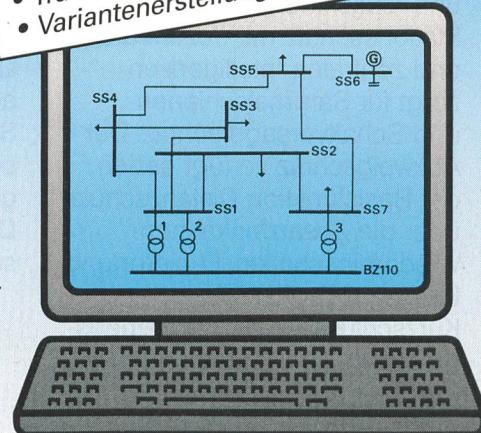


Wie berechnen Sie Lastfluss und Kurzschluss-Ströme?

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