

# Vollstatische 100-MW-Frequenz- kupplung Bremen

**Für den Energieaustausch zwischen einem Bahnnetz und dem Landesnetz werden heute vorzugsweise statische Frequenzrichter eingesetzt. Mit einer Nennleistung von 100 MW ist die vollstatische Frequenzkupplung Bremen zur Zeit die weltweit größte derartige Anlage in GTO-Technologie. Durch gezielte Weiterentwicklungen der GTO-Thyristoren, eine neuartige Ansteuerung und die GTO-Serienschaltung war es möglich, eine wirtschaftliche vollstatische Frequenzkupplung 16⅔ Hz - 50 Hz mit dieser großen Leistung zu bauen. Sie zeichnet sich u. a. durch einen gegenüber früheren Anlagen deutlich verbesserten Wirkungsgradverlauf über den gesamten Leistungsbereich und eine hohe Verfügbarkeit aus.**

**A**us historischen Gründen werden Bahnnetze in vielen Ländern mit vom Landesnetz abweichender Frequenz oder mit Gleichstrom betrieben [1,2,3]. Die Bahnverwaltungen verfügen einerseits über eigene Kraftwerke, sind wegen des zeitlich stark schwankenden Energiebedarfs aber meistens auch mit dem Landesnetz verbunden. In Deutschland bestehen zum Beispiel an etwa 40 Orten Netzkupplungen zwischen dem Bahnnetz und der öffentlichen Stromversorgung. Über diese beziehen die Bahnen rund einen Viertel ihres Strombedarfs. Durch die Kupplungen wird insbesondere auch eine Stabilisierung des Bahnnetzes erreicht. Da die meisten Netzkupplungen den Energieaustausch in beiden Richtungen, vom Landesnetz ins Bahnnetz und umgekehrt, erlauben, kann die Stromerzeugung im Bahnnetz wirtschaftlicher gestaltet werden.

## Betrieb der Frequenzkupplung und Umweltschutz

Bei der Roheisenerzeugung der *Stahlwerke Bremen GmbH* fallen im Hochofen erhebliche Gichtgasmenen an, die über

Rohrleitungen mit bis zu 1,8 m Durchmesser zum naheliegenden Kraftwerk Mittelsbüren geleitet und von der *Stadtwerke Bremen AG* zur Bahnstromerzeugung für die *Deutsche Bahn AG* verwertet werden. Diese bereits seit 1964 erfolgreiche Zusammenarbeit bei der Gichtgasnutzung ist für die Umwelt ein großer Gewinn, denn dadurch wird in anderen Kraftwerken Kohle eingespart und damit die CO<sub>2</sub>-Emission erheblich reduziert.

Weil aber der Bahnstrombedarf an Wochenenden zurückgeht, mußte bisher

### Rüdiger Boeck

Stadtwerke Bremen AG

### Osvin J. Gaupp

Peter Dähler

### Eugen Bärlocher

Johannes Werninger

ABB Industrie AG

### Plinio Zanini

ABB Kraftwerke AG

ein Teil des Gichtgases abgefackelt werden. Mit der jetzt in Mittelsbüren in Betrieb genommenen vollstatischen 100-MW-Frequenzkupplung **1**, **2**, **3** können die Stadtwerke Bremen Bahnstrom in Drehstrom und umgekehrt umwandeln und damit die Gichtgasverwertung wesentlich verbessern. Künftig kann das ganze Gichtgas zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Was die Deutsche Bahn AG nicht abnimmt, wird umgewandelt und in das Netz der Stadtwerke Bremen AG eingespeist.

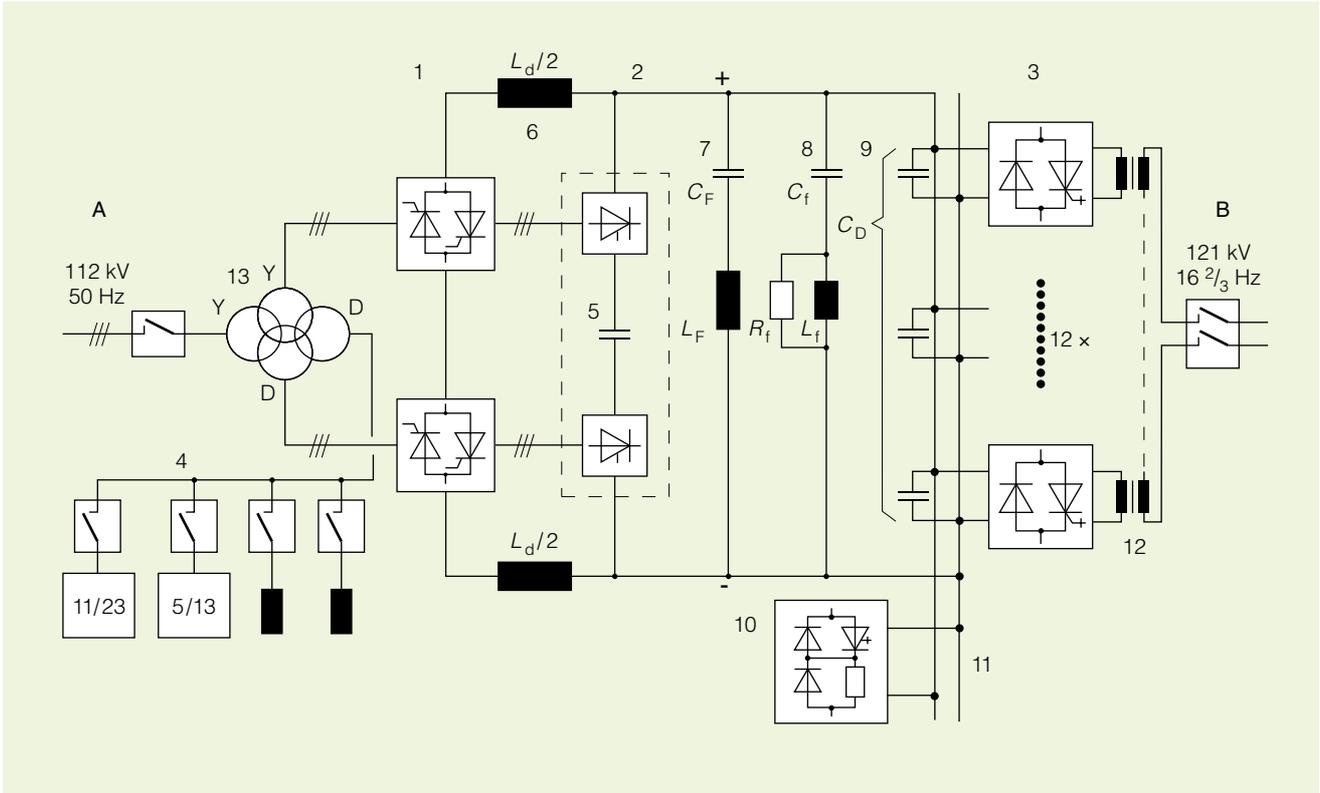
Bisher betrug der Umweltvorteil aus der Kooperation von Stahlwerk, Bahn und Stadtwerken ca. 750 000 t CO<sub>2</sub> pro Jahr, deren Emission in anderen Kraftwerken vermieden wurde. Mit dem neuen Umrichter wird die Umwelt pro Jahr zusätzlich um ca. 150 000 t CO<sub>2</sub> entlastet.

Die vollstatische Netzkupplung für Energieübertragung vom 16⅔- in das 50-Hz-Netz und umgekehrt erhöht zudem die Versorgungssicherheit in beiden Netzen, da bei Leistungsmangel des einen Netzes mit Hilfe des anderen ausgeglichen werden kann.

Über die Netzkupplung können die Bahnstromblöcke des Kraftwerks Mittelsbüren in die Drehstromerzeugung einbezogen werden, oder umgekehrt kann das Bahnstromnetz aus dem 50-Hz-Netz kostengünstig versorgt werden, wenn weniger oder kein Gichtgas verfügbar ist oder aus anderen Gründen nicht die volle Kraftwerksleistung zur Verfügung steht. Damit ist sichergestellt, daß alle Kraftwerke der jeweiligen Versorgungs-, Brennstoff- und Kostensituation angepaßt und die Lieferverpflichtungen gegenüber der Deutschen Bahn AG unabhängig von der Gichtgaslieferung jederzeit eingehalten werden können.

## Von Maschinensätzen zu statischen Umrichtern

In der Vergangenheit wurden Umformerwerke zwischen Bahnnetzen und dem Landesnetz mit rotierenden Maschinensätzen ausgerüstet. Mit zunehmender Bewährung der Leistungselektronik und



**Prinzipialschaltbild der vollstatischen 100-MW-Frequenzkupplung Bremen**



- |   |   |
|---|---|
| A Drehstromnetz   | 6 Glättungsdrosselspule                         |
| B Bahnnetz  | 7 33-Hz-Filter                                  |
| 1 Thyristorstromrichter                                 | 8 Hochpaßfilter                                 |
| 2 Gleichspannungszwischenkreis                          | 9 Stromrichterernahe Zwischenkreiskondensatoren |
| 3 GTO-Stromrichter (12 x)                               | 10 Spannungsbegrenzer                           |
| 4 Filter- und Kompensationsanlage (11/23, 5/13: Filter) | 11 Zwischenkreisschienen                        |
| 5 Summenlöschkreis (SLK)                                | 12 Summiertransformator, Bahnstromnetz          |
|   | 13 Stromrichtertransformator, Drehstromnetz     |

insbesondere seit der erfolgreichen Einführung der abschaltbaren (GTO-)Thyristoren wird den statischen Umformern jedoch der Vorzug gegeben, und zwar aus folgenden Gründen:

- etwa 5% besserer Wirkungsgradverlauf über den gesamten Leistungsbereich [2]
- geringere Investitionskosten wegen der aufwendigen Fundamente rotierender Anlagen
- kleinere Wartungs- und Stillstandszeiten und somit höhere Verfügbarkeit
- größere Servicefreundlichkeit durch die Modulbauweise einfach handhabbarer Komponenten

Die bisherigen statischen Bahnnetz-  
kupplungen bestehen aus Umformereinheiten

von höchstens etwa 15 MVA. Ein erster Schritt zu höheren Leistungen gelang ABB bei der 2 x 25-MVA-Anlage der *Schweizerischen Bundesbahnen (SBB)* in Giubiasco, die seit 1994 im kommerziellen Betrieb steht [1, 3].

**Bremen: hohe Leistung eines einzelnen Umrichters**

1991 hatte die *Stadtwerke Bremen AG* ABB Kraftwerke AG und ABB Industrie AG beauftragt, eine Machbarkeitsstudie für einen leistungsstarken Umrichter 16 2/3 Hz – 50 Hz mit GTO-Serienschaltung und mit bis zu 100 MW Übertragungsleistung in beiden Richtungen zu erstellen. Die Studie zeigte, daß durch gezielte Wei-

terentwicklung der GTOs, eine neuartige harte Ansteuerung und die GTO-Serienschaltung [4] eine wirtschaftliche, vollstatische Frequenzkupplung 16 2/3 Hz – 50 Hz hoher Leistung gebaut werden kann.

Die Hauptdaten der Frequenzkupplung Bremen sind in *Tabelle 1* zusammengestellt. Die Anlage besteht aus einem einzigen Umrichter von 100 MW/MVA. Der damit erreichte große Leistungssprung gelang dank mehrerer bedeutender Innovationsschritte der GTO-Technologie, wobei höchste Zuverlässigkeit gewährleistet ist.

Im Vergleich zu Umrichtern mit mehreren Teilanlagen bietet die in einem einzigen Umrichter konzentrierte hohe Leistung

**Tabelle 1:**  
**Hauptdaten der Frequenzkupplung Bremen**

<i>Dauernennleistung</i>	
Energieübertragung in beiden Richtungen, Leistung auf Bahnseite gemessen	100 MVA, $\cos \varphi = 0,8$ 100 MVA, $\cos \varphi = 1,0$
<i>Drehstromnetz</i>	
Betriebsspannung	112 kV $\pm 5\%$
Betriebsfrequenz	50 Hz $\pm 0,5\%$
<i>Rückwirkungen auf das Drehstromnetz</i>	
Spannungsüberschwingungen	gemäß VDEW
<i>Bahnnetz</i>	
Nennbetriebsspannung (S = 100 MVA)	121 kV
Bereich der Betriebsspannung	97...123 kV
Bereich der Betriebsfrequenz	16 $\frac{2}{3}$ Hz $\pm 2\%$
<i>Rückwirkungen auf das Bahnnetz</i>	
Spannungsüberschwingungen	
Gesamtverzerrung $P_n$	DU 150 $\leq 0,5\%$
<i>Garantierter Wirkungsgrad</i>	
Leistung an der 16,7-Hz-Schiene, Leistungsrichtung 16 $\frac{2}{3}$ Hz $\Rightarrow$ 50 Hz	
72 MW, $\cos \varphi = 0,8$	94,9%
90 MW, $\cos \varphi = 1,0$	95,6%

einen höheren Wirkungsgrad. Dank einer geringeren Anzahl von Komponenten ist auch die Zuverlässigkeit grundsätzlich höher, und sowohl die Investitions- als auch die Betriebskosten sind niedriger. Bei der Anlage Bremen ist wesentlich, daß die notwendige Redundanz im Umrichter selbst gewährleistet wird.

**Schaltung und Anordnung der Frequenzkupplung**

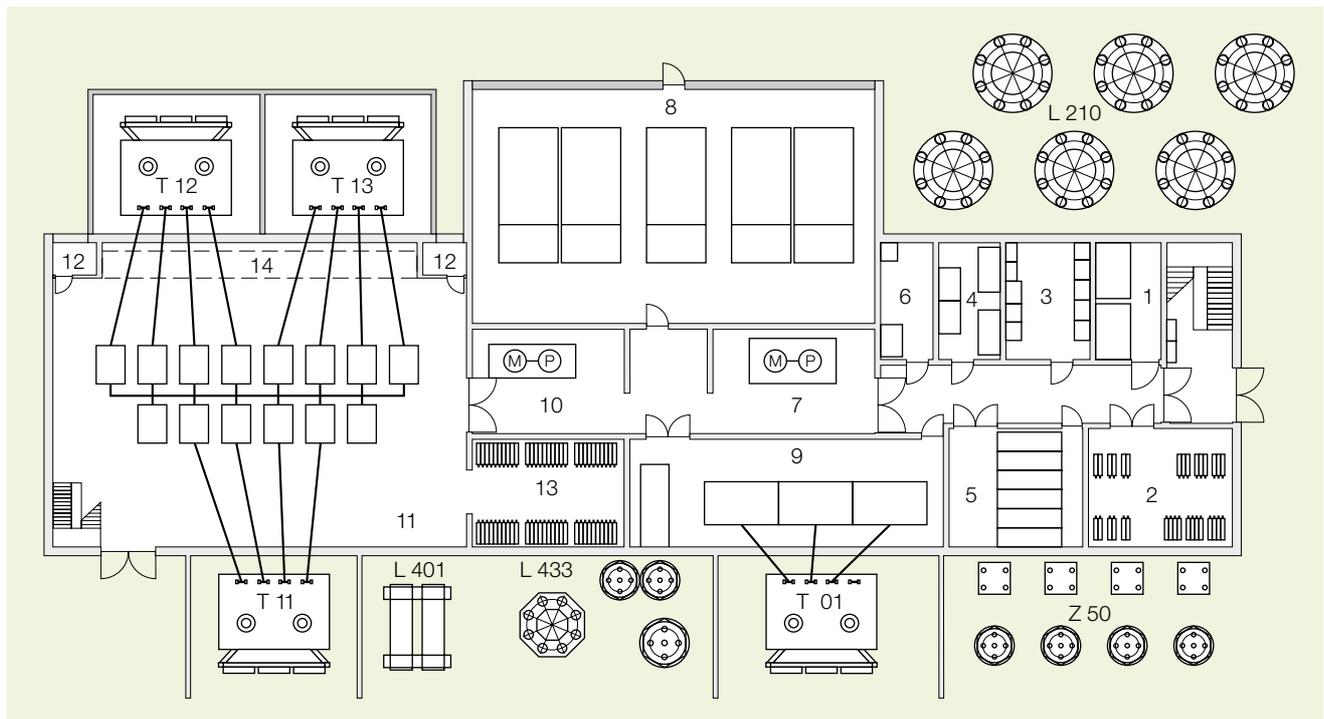
Der Hauptstromkreis der Netzkupplung Bremen **1** besteht im wesentlichen aus dem drehstromseitigen Thyristorstromrichter, dem Gleichspannungszwischenkreis, dem bahnseitigen GTO-Stromrichter und den Umrichtertransformatoren. Ein-gezeichnet sind auch die Filter- und Kompensationseinrichtungen für das Drehstromnetz und im Zwischenkreis sowie die wichtigsten Schutzgeräte gegen Über-

**Grundriß der Frequenzkupplung mit dem Erdgeschoß des Umrichtergebäudes**

- 1 Hilfsstraforum
- 2 50-Hz-Filterraum
- 3 USV- und AC-Verteilung
- 4 Batterieraum
- 5 20-kV-Schaltanlage
- 6 DC-Verteilung
- 7 Rückkühlanlage 50 Hz

- 8 Wasser/Luft-Wärmetauscher
- 9 Stromrichterraum 50 Hz und SLK
- 10 Rückkühlanlage 16 $\frac{2}{3}$  Hz
- 11 Stromrichterraum 16 $\frac{2}{3}$  Hz
- 12 Ventilation
- 13 Kondensatoren zu 33-Hz-Filter
- 14 Lüftungsrohre

- T11-T13 Transformatoren 16 $\frac{2}{3}$  Hz
- T01 Transformator 50 Hz
- L210 Blindleistungs-kompensation 50 Hz
- L401 Glättungs-drossel
- L433 Drossel zu 33-Hz-Filter





**Vollstatische 100-MW-Frequenzkupplung Bremen**



- 1 Umrichtergebäude    2 Kompensationsdrosselspulen    3 Wasser/Luft-Wärmetauscher    4 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Transformatoren

spannungen im Zwischenkreis und zum Schutz der Anlage beim Wechselrichterkippen (SLK). Im Netz der Stadtwerke Bremen AG sind die Spannung und die Frequenz praktisch konstant. Dagegen können im Bahnnetz sowohl die Spannung (97–123 kV) als auch die Frequenz (16,3 – 17,0 Hz) im normalen Betrieb beträchtlich schwanken. Die Nennspannung und der Nennstrom des Zwischenkreises betragen 10 kV und 10,5 kA.

Die Anlage wurde direkt hinter der 110-kV-Schaltanlage der Stadtwerke Bremen AG, angrenzend an die 110-kV-Schaltanlage der Deutschen Bahn AG, errichtet. In einem zweigeschossigen Gebäude sind die Stromrichter, die Steuerung, die Regelung und die Überwachung untergebracht. Ebenso befinden sich wegen der starken Beeinträchtigung durch das Hüttenwerk und das Seeklima

sämtliche Kondensatorbänke im Gebäude. Nur die Transformatoren, die Kompensationsspulen, die Glättungsdrosseln und die Filterkreisspulen sind vor dem Gebäude aufgestellt **2, 3**.

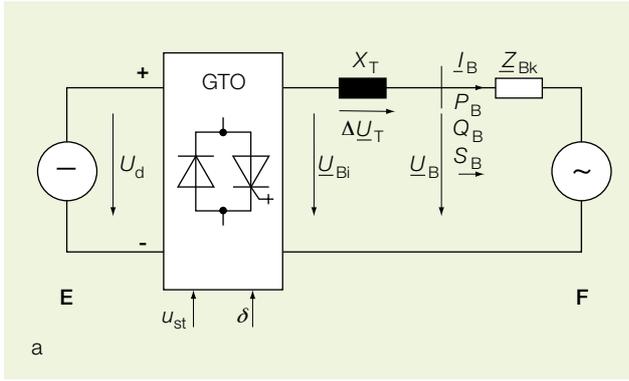
Das Gebäude weist im Grundriß Abmessungen von 54 x 15 m auf. Die Raumaufteilung im Obergeschoß ist im Prinzip dieselbe wie im Erdgeschoß, da die Hauptkomponenten (beide Stromrichter, die Zwischenkreiskondensatoren und die Summenlöschkreise) auf beide Stockwerke verteilt und identisch angeordnet sind. Diese Anordnung wurde gewählt, um möglichst kurze Wege für die Verbindungsschienen zu erhalten.

Der Übersichtlichkeit der Anlage und der guten Zugänglichkeit zu den Anlagekomponenten wurde ein großer Stellenwert beigemessen. Die Anlage schöpft damit die inhärenten Vorteile des modu-

laren Aufbaus der statischen Umrichter voll aus: Wartungsfreundlichkeit, geringe Instandhaltungskosten, kurze Austausch- bzw. Reparaturzeiten im Fehlerfall und damit hohe Verfügbarkeit. Der Raum für den bahnseitigen Stromrichter ist so bemessen, daß eine gute Zugänglichkeit zu allen Komponenten gewährleistet ist. Je die Hälfte der Stromrichter- und Spannungsbegrenzermodule befinden sich auf einem Stockwerk.

Die Leittechnikschränke sind im Obergeschoß in zentraler Lage bezüglich der Leistungskomponenten untergebracht, so daß sich kurze Kabelwege ergeben. Ebenso ist im Obergeschoß ein MMI-Platz (Mensch-Maschine-Interface) für die gelegentliche lokale Bedienung angeordnet.

Die Transformatoren sowie die Kompensations-, Filter- und Glättungsdrosseln befinden sich außerhalb des Gebäudes in



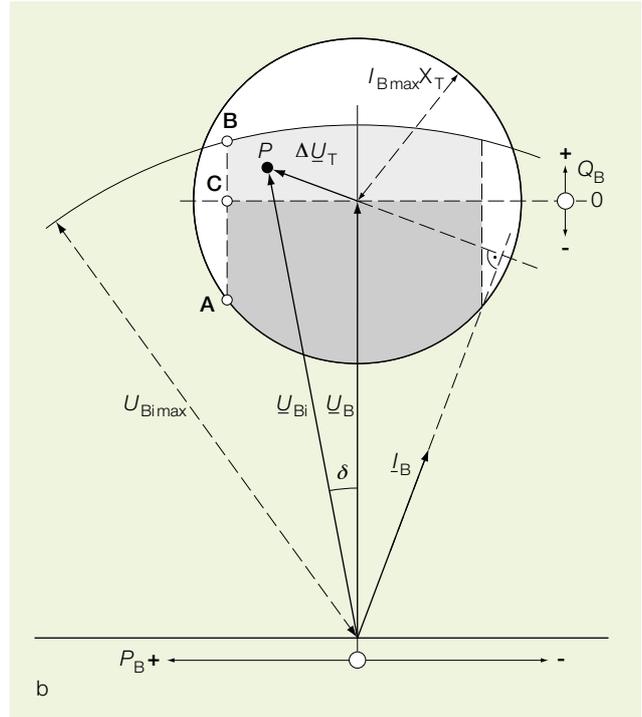
**Funktionsprinzip des GTO-Stromrichters**

4

a Ersatzschaltbild

E Gleichspannungszwischenkreis  
F Bahnnetz

- $U_d$  Gleichspannung
- $U_{Bi}$  Innere Umrichterspannung
- $X_T$  Kurzschlußreaktanz des bahnseitigen Transformators
- $\Delta U_T$  Spannungsabfall über  $X_T$
- $U_B$  Bahnnetzspannung im Anschlußpunkt
- $Z_{Bk}$  Kurzschlußimpedanz des Bahnnetzes
- $P_B, Q_B, S_B$  In das Bahnnetz eingespeiste Leistungen
- $I_B$  Ausgangsstrom des GTO-Umrichters
- $u_{st}, \delta$  Stellgrößen der Regelung



b Vereinfachtes Zeigerdiagramm des GTO-Stromrichters  
A, B, C Spezifizierte Arbeitspunkte

unmittelbarer Nähe der entsprechenden Leistungsteile im Gebäude.

**Funktionsprinzip und Auslegung der Bahnseite**

Die Gleichspannung des Zwischenkreises wird vom drehstromseitigen Stromrichter konstant gehalten. Der GTO-Stromrichter erzeugt eine in Amplitude und Phase frei verstellbare innere Spannung, deren Frequenz durch den Verbundbetrieb festgelegt ist. Bezugsgrößen für die Stellgrößen des Stromrichters sind die Spannung und die Phasenlage am Anschlußpunkt des Bahnnetzes.

Die prinzipielle Funktionsweise des GTO-Stromrichters ist im Zeigerdiagramm 4b dargestellt. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Kurzschlußreaktanz  $X_T$  des einphasigen Umrichtertransformators 4a. Die innere Umrichterspannung  $U_{Bi}$  kann innerhalb bestimmter Grenzen (grauer Bereich) frei eingestellt werden. Dadurch wird der Spannungsabfall  $\Delta U_T$  und damit

der Strom  $I_B$  in Amplitude und Phase festgelegt.

Die Bereitstellung von spannungstützender Blindleistung wird durch die maximal einstellbare innere Spannung begrenzt. Diese ergibt sich aus der Gleichspannung des Zwischenkreises und dem nachfolgend beschriebenen Steuerverfahren des GTO-Stromrichters. Dabei ist zu beachten, daß wegen der Schaltzeitrestriktionen nicht die volle Steuerspannung  $u_{st}$  ausgenützt werden kann (der maximale Aussteuerungsfaktor beträgt 0,96).

Die Scheinleistung  $S_B$  wird begrenzt durch den vom GTO-Stromrichter und vom Umrichtertransformator maximal fñhrbaren Strom  $I_B$  (kleiner Kreis in 4b). Während diese Grenze beim Transformator nur thermisch bedingt ist, muß beim GTO-Stromrichter auch die Abschaltfähigkeit der Halbleiter berücksichtigt werden. Eine Wirkleistungsbegrenzung (senkrechte Begrenzung der grauen Fläche) ist ferner durch die Auslegung der drehstromsei-

gen Einspeisung (Thyristorstromrichter usw.) gegeben.

Das bahnseitige PQ-Diagramm 5 entspricht den festgelegten Leistungsdaten (Tabelle 2). Der Kreis  $U_B = 121$  kV enthält die drei spezifizierten Arbeitspunkte A, B und C. Er entspricht dem höchstzulässigen Strom des GTO-Stromrichters. Dieser bestimmt auch die Höchstleistung bei geringerer Bahnnetzspannung. Im übererregten Bereich wird im Punkt B die Leistungsgrenze durch die höchstmögliche Umrichterspannung festgelegt.

Da ein leistungsgleicher antiparalleler Thyristorstromrichter vorhanden ist, gelten für den Energiefluß vom Bahnnetz ins Drehstromnetz symmetrische Arbeitspunkte A', B', C'.

**Steuerverfahren und Ausgangsspannung**

Als Steuerverfahren wurde ein klassisches, von der Antriebstechnik her bekanntes und bewährtes Puls-Weiten-

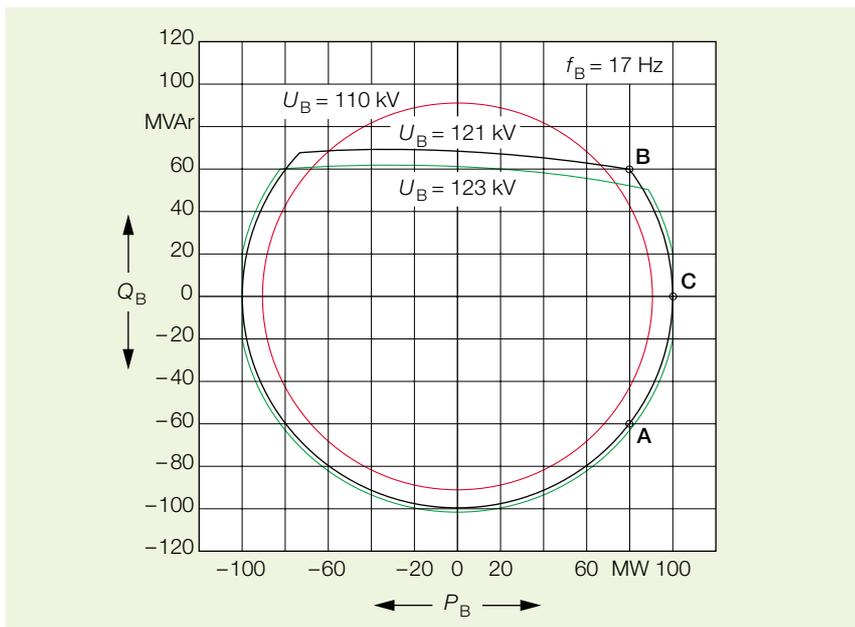
Modulationsverfahren (PWM) gewählt. Die Schaltbefehle für die einzelnen  $U$ -Module werden durch Vergleich der Momentanwerte der sinusförmigen Steuerspannung  $u_{st}$  und der dreieckförmigen Trägerspannungen (Hilfssteuerspannungen  $u_{hm}$  und  $u_{hp}$ ) gewonnen **6**. Die Trägerfrequenz entspricht der dreifachen Bahnnetzfrequenz. Dadurch leistet jeder GTO pro Bahnnetzperiode drei Schaltzyklen.

Alle zwölf GTO-Brücken werden mit diesem PWM-Verfahren angesteuert, doch sind die Trägersignale zweier benachbarter Stufen jeweils um  $15^\circ$  elektrisch ( $180^\circ/12$  bezogen auf die Trägerperiode) versetzt. Dadurch ergeben sich zwölf gegenseitig versetzte Stufenspannungen. Die Aufsummierung dieser Stufenspannungen durch die Serienschaltung im bahnnetzseitigen Transformator liefert eine angenähert sinusförmige Ausgangsspannung mit sehr geringem Oberschwingungsgehalt **7**. Es sind deshalb keine zusätzlichen Filter notwendig.

Die Steuerung der Ausgangsspannung erfolgt durch Verstellung der Amplitude

**Bahnseitiges PQ-Diagramm**

- $P_B$  Wirkleistung, positiv für Energiefluß 50 Hz  $\Rightarrow 16\frac{2}{3}$  Hz
- $Q_B$  Blindleistung, positiv wenn übererregt
- $U_B$  Bahnnetzspannung am Anschlußpunkt
- $f_B$  Frequenz der Bahnnetzspannung
- A, B, C Spezifizierte Arbeitspunkte



**Tabelle 2:**  
**Spezifikation der Leistungsdaten am Bahnanschlußpunkt**

	A (untererregt)	Arbeitspunkt B (übererregt)	C
Bahnspannung $U_B$	121 kV	121 kV	121 kV
Bahnfrequenz $f_B$	16,2...17 Hz	16,2...17 Hz	16,2...17 Hz
Wirkleistung $P_B$	80 MW	80 MW	100 MW
Blindleistung $Q_B$	-60 MVar	+60 MVar	0 MVar
Scheinleistung $S_B$	100 MVA	100 MVA	100 MVA
$\cos \varphi$	0,8	0,8	1

der Steuerspannung  $u_{st}$  und ihrer Phasenlage  $\delta$  bezogen auf die Bahnnetzspannung  $U_B$  im Anschlußpunkt der Frequenzkupplung.

**Bahnseitiger Stromrichter**

In der GTO-Technologie des bahnsseitigen Stromrichters liegen die entscheidenden Entwicklungsfortschritte, die die Realisie-

rung der hohen Leistung der Frequenzkupplung Bremen ermöglichten. Der Stromrichter besteht aus **1**:

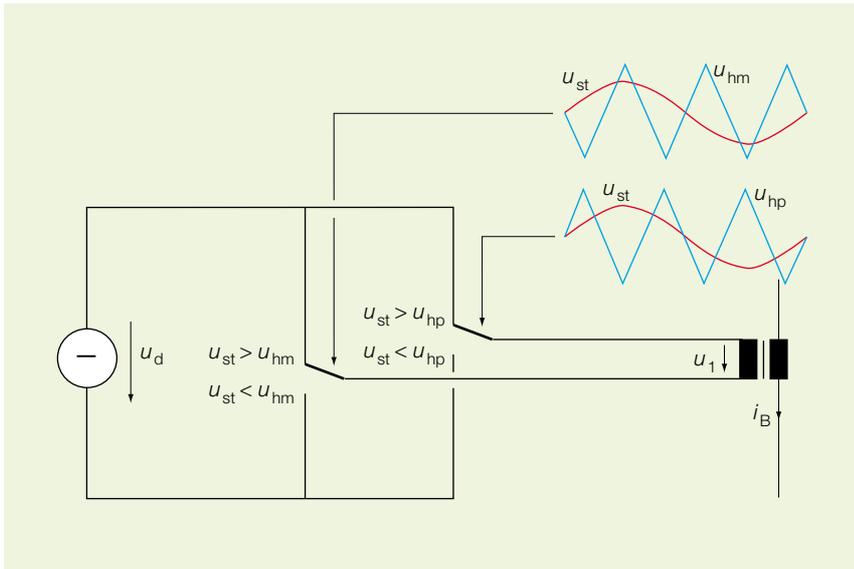
- zwölf H-Brücken mit je zwei Phasenbausteinen (U-Module), sie sind am Zwischenkreis parallel angeschlossen
- vier Spannungsbegrenzern im Zwischenkreis
- einem direkt angekoppelten Zwischenkreis, bestehend aus einer niederinduktiven Sammelschiene und Zwischenkreiskondensatoren
- der stromrichternahen Elektronik

**Niederinduktive Phasenmodule**

In den Phasenmodulen sind jeweils sechs GTOs in Serie geschaltet. Der Phasenbaustein mit der Zwischenkreisverschiebung und den direkt angeschlossenen Kondensatoren ist extrem niederinduktiv ausgeführt, damit die in der Streuinduktivität gespeicherte Energie und demzufolge die beim Schalten auftretenden Spannungsbeanspruchungen gering bleiben **8**.

Als stromrichternahe Zwischenkreiskondensatoren dienen extrem niederinduktive Hochspannungskondensatoren (200 nH pro 10-kV-Einheit). Die Kondensatorwickel sind in selbstheilender trockener Technologie ausgeführt. Im Fall eines internen Isolationsdefekts verdampft die Metallschicht lokal begrenzt, ohne daß ein Kurzschluß entsteht.

Die Kühlung der Leistungshalbleiter,



**Prinzip des PWM-Steuerverfahrens**

$u_d$  Gleichspannung  
 $u_{st}$  Steuerspannung  
 $u_{hm}, u_{hp}$  Hilfssteuerspannungen

$u_1$  Ausgangsspannung einer Stufe  
 $i_B$  Ausgangsstrom des GTO-Umrichters

6

Beschaltungswiderstände und Strombegrenzungsdröseln erfolgt mit entionisiertem Reinwasser. Eine erzwungene Luftkühlung mittels Ventilatoren ist im Stromrichter nicht notwendig, wodurch eine höhere Zuverlässigkeit erreicht wird.

**Serienschaltung und Redundanz**

Die Serienschaltung der GTOs stellt sehr hohe Anforderungen an die zeitliche Genauigkeit der Schaltvorgänge. Verlangt wird, daß alle in Serie geschalteten GTOs innerhalb von 200 ns schalten. Dazu hat ABB die sogenannte harte Ansteuerung entwickelt, die durch einen Gatestrom wesentlich höherer Steilheit und Amplitude gekennzeichnet ist als bei konventioneller Ansteuerung üblich [4]. Dazu mußte die Induktivität der Ansteuereinheit um etwa einen Faktor 100 vermindert werden, was zu einem völlig neuen Aufbau führte. GTO und Ansteuereinheit bilden eine kompakte konstruktive Einheit.

Die Nenngleichspannung des Zwischenkreises beträgt 10 kV. Vier in Serie geschaltete GTOs in jedem Brückenweig würden deshalb genügen. Bei sechs in Serie geschalteten GTOs kann ein Halb-

leiter ausfallen, ohne daß die Funktion der Anlage beeinträchtigt wird. Fällt ein zweiter GTO im selben Zweig aus, wird die Anlage kontrolliert abgeschaltet. Durch den Einbau von redundanten Halbleiterplätzen wird die Spannungsbelastung aller Komponenten vermindert und damit die mittlere Lebensdauer wesentlich verlängert.

Berechnungen auf Grund von Felddaten zeigen, daß der gesamte GTO-Stromrichter dank der Serienschaltung und der eingebauten Redundanz im Mittel nur alle sieben Jahre ausfallen wird. Dabei sind jährliche Wartungen vorausgesetzt, bei denen defekte redundante Bauelemente, die während des Betriebes erfaßt wurden, ausgetauscht werden. Tauscht man diese in kürzeren Intervallen aus, so wird die Verfügbarkeit wesentlich erhöht.

**Zwischenkreisverschienung**

Die Notwendigkeit der niederinduktiven Ausführung gilt auch für den stromrichter-nahen Teil des Zwischenkreises. Die beiden Leiter des Zwischenkreises bestehen deshalb aus flachen, eng aneinanderliegenden Schienen, die nur durch eine Iso-

lierschicht aus MICADUR® getrennt sind. Bei internen Kurzschlüssen können hohe mechanische Beanspruchungen auftreten. Die Konstruktion ist so ausgelegt, daß alle erdenklichen Fehlerfälle beherrscht werden. Die Beanspruchungen wurden nicht nur berechnet und simuliert, sondern auch im Hochstromlabor überprüft 9.

**Spannungsbegrenzer**

Die Gleichspannung wird durch schnelle Regelkreise vom einspeisenden Thyristorstromrichter konstant gehalten. Trotzdem können Störungen in den beteiligten Netzen zu transienten Überspannungen führen. Zum Schutz des GTO-Stromrichters ist deshalb ein Spannungsbegrenzer eingebaut, der beim Erreichen der zulässigen Grenzspannung im Zwischenkreis rasch einen Leistungswiderstand einschaltet. Dieser Spannungsbegrenzer besteht aus vier parallelen GTO-Schaltern mit Leistungswiderständen. Dabei handelt es sich um vier leicht abgeänderte Zweige des Phasenmoduls des GTO-Stromrichters, ergänzt durch den Widerstand und durch Freilaufdiolen.

**Schutz**

Das Schutzkonzept umfaßt drei Stufen: Prävention, Schutzzünden sowie Schadensbegrenzung im Notfall. Das wichtigste Prinzip ist das Wahrnehmen aller Möglichkeiten zur Verhinderung von Fehlersituationen. Diesem Ziel dient die Verwendung von redundanten GTOs sowie das kontrollierte Abschalten beim Ausfallen eines zweiten GTOs im gleichen Zweig. Ferner verhindert die Verriegelung der beiden Zweige einer GTO-Phase, daß diese gleichzeitig leitend werden können.

Versagen die präventiven Maßnahmen, wird eine Durchzündung durch eine schnelle und redundante Meßeinrichtung innerhalb weniger Mikrosekunden erfaßt. Zur Entlastung der fehlerhaften GTO-Phase werden alle restlichen GTO-Phasen des Stromrichters gezündet (Schutzzündung). Der Stromrichter ist so ausgelegt, daß dabei keine Schäden

entstehen. Dank der präventiven Maßnahmen tritt das Schutzzünden zudem äußerst selten auf.

Darüber hinaus ist der GTO-Stromrichter so ausgelegt, daß er auch ein Versagen des Schutzes übersteht. Wenn der gesamte Fehlerstrom durch eine zentrale Fehlerstelle fließt, können zwar alle Halbleiter der fehlerhaften Phase (GTOs und Dioden) zerstört werden, es entstehen jedoch weder mechanische noch thermische Folgeschäden. Es bildet sich weder ein Plasma, noch explodieren einzelne Komponenten.

**Verifikation**

Da es sich beim GTO-Stromrichter Bremsen um eine Erstauführung mit weitgehend neuer Technologie handelt, kam der Verifikation aller Bauelemente und Baugruppen hohe Bedeutung zu. Die Ab-

sicherung erfolgte gegenseitig ergänzend auf zwei Ebenen: mittels Simulation an hochentwickelten Modellen und durch Prüfung von Anlageteilen im Labor.

Für die Simulation stand ein neues Simulationsprogramm mit verbesserten Modellen der Leistungshalbleiter zur Verfügung. Die notwendigen Parameter wurden speziellen Hardware-Messungen entnommen. Auf diese Weise konnten u.a. das Durch- und das Schutzzünden unter Berücksichtigung aller Anlageteile sowie der Netze abgesichert werden. Ebenso konnten der Einfluß der Toleranzen der Bauelemente abgeklärt und «worst-case»-Untersuchungen durchgeführt werden.

Die durch Normen vorgeschriebenen Typenprüfungen wurden durch folgende Prüfungen ergänzt:

- Untersuchung der Vorgänge im Hochfrequenzbereich während bahnseitiger transienter Netzfehler

- Nachweis durch Stoßstromversuche, daß selbst beim Versagen aller Schutzstufen keine mechanische Beschädigung von Komponenten eintritt
- Nachweis durch weitere Stoßstromversuche, daß sich die Kenndaten der Halbleiterelemente auch nach 100 Schutzzündimpulsen nicht verändern
- Dauerversuche von mehr als 100 h mit 150 % Nennstrom, 120% Nennspannung, 150 % Nennfrequenz und total abgebauter Redundanz [4]

**Bahnseitige Transformatoren**

Der bahnseitige Summiertransformator besteht aus sechs zweiphasigen Einheiten mit Rückschlußschenkel **10**. Der Rückschlußschenkel entkoppelt magnetisch die zwei Phasen, so daß diese wie Einzeltransformatoren wirken. Die Sekundärwicklungen der zwei Phasen werden von

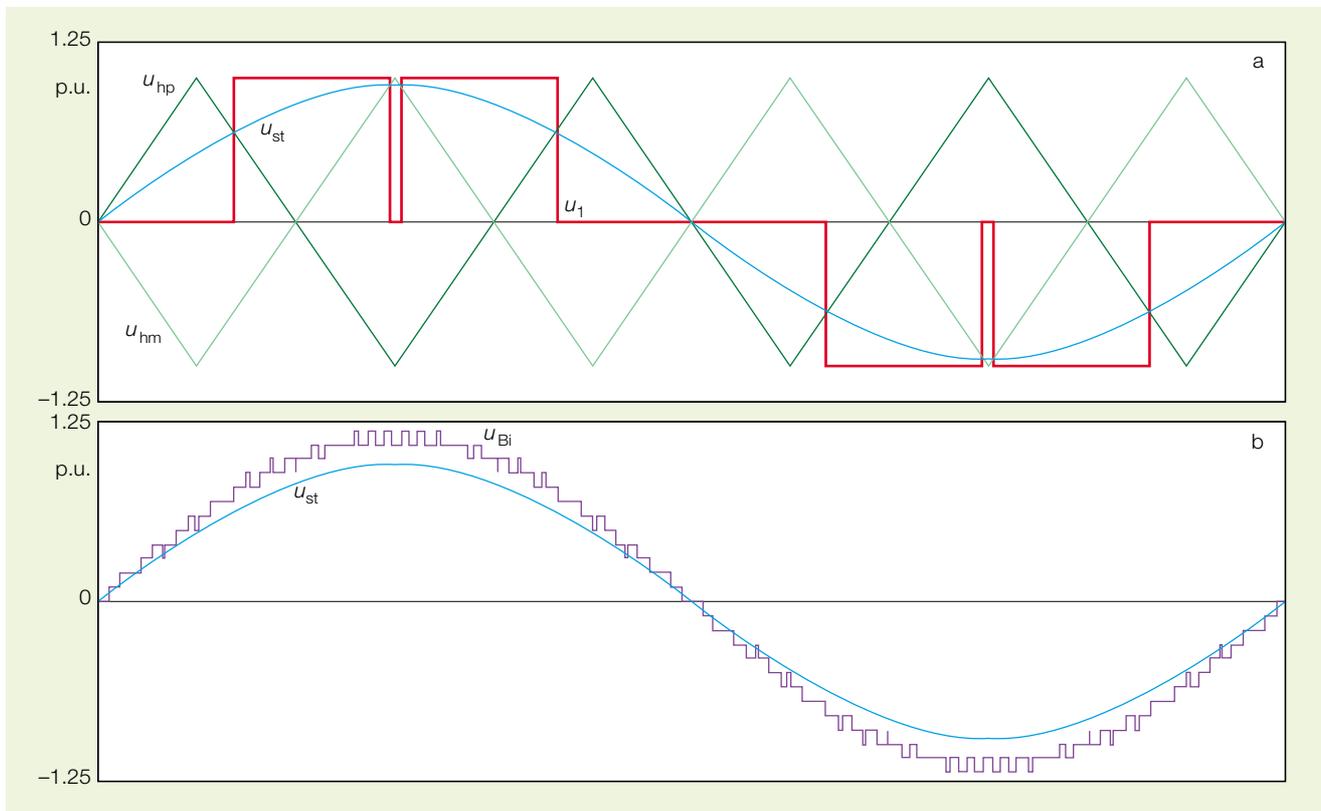
**Spannungsbildung des GTO-Umrichters**

**7**

a Verlauf der Spannung  $u_1$  einer Stufe

b Resultierende innere Umrichterspannung  $u_{Bi}$  am Ausgang des Summiertransformators bei einer Steuerspannung von  $u_{st} = 0,9$

$u_{hm}$ ,  $u_{hp}$  Hilfssteuerspannungen





**Niederinduktiver Phasenbaustein**

- 1 Ansteuereinheit      2 Halbleiterstapel      3 Beschaltung

modulationsmäßig benachbarten GTO-Brücken gespeist. Ihre Grundschwingungskomponenten sind zwar phasengleich, wegen des versetzten Pulsmusters sind die Oberschwingungen jedoch phasenverschoben und ergeben im stationären Betrieb einen magnetischen Fluß im Rück-

schlußschenkel von ca. 10% des Hauptflusses der bewickelten Schenkel. Trotzdem ist der Rückschlußschenkel querschnittsmäßig gleich dimensioniert wie die Hauptschenkel, um vorübergehend, z. B. bei Netzfehlern, eine weitgehend unabhängige Taktung der zwei GTO-Brücken zu

ermöglichen, ohne daß es zu Sättigungserscheinungen im Transformator kommt.

Demzufolge wurde für die zweiphasige Einheit ein gewöhnlicher Drehstrom-Transformator aus kornorientiertem Transformatorblech verwendet, bei dem nur die Außenschenkel Wicklungen tragen. Je Schenkel sind eine Primär- (bahnseitig) und eine Sekundärwicklung konzentrisch angeordnet. Alle Primärwicklungen wurden für die volle Prüfspannung isoliert. Je zwei zweiphasige Einheiten befinden sich in einem gemeinsamen Kessel.

Besondere Aufmerksamkeit wurde einer möglichst kleinen Streuung der Leerlaufimpedanzen der einzelnen Phasensysteme gewidmet, denn diese Impedanzen bestimmen bei gesperrten GTO-Ventilen die Aufteilung der Bahnnetzspannung auf die Transformatoren und damit auf die GTO-Brücken. Eine stark ungleiche Verteilung könnte dazu führen, daß bei den Brücken mit dem größeren Spannungsanteil die Amplitude der Wechselspannung größer ist als die Zwischenkreisspannung, so daß der Zwischenkreis über die Dioden der H-Brücken überladen würde.

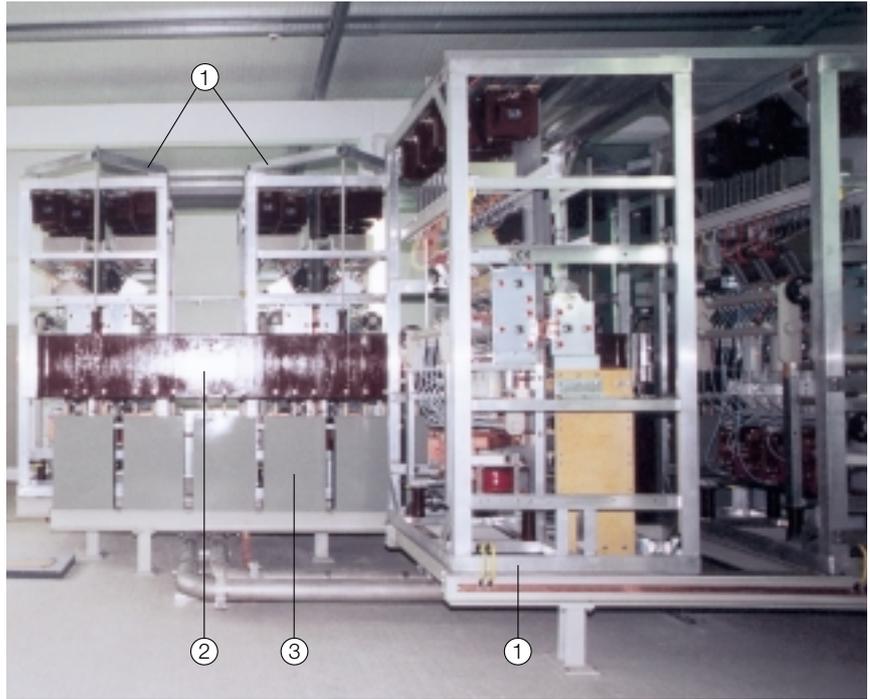
Bekannt ist auch das Problem der Gleichspannungskomponente in der Ausgangsspannung der GTO-Brücken infolge nichtidealer Schaltzeitpunkte. Schon ein relativ kleiner Anteil dieser Gleichspannungskomponente kann zu Sättigungserscheinungen im Transformator führen, die Brücke mit Magnetisierungsstrom belasten und sogar den Betrieb verunmöglichen. Dieses Problem wächst mit der Größe der Anlage und wird zudem durch die Serienschaltung der GTOs verschärft. In der Anlage Bremen würde ein konstanter Fehler von nur 1 µs pro Phase zu einem Gleichspannungsanteil von 33 mV führen, der den Transformator mit einer Induktion von ca. 1,4 T einseitig vormagnetisiert. Dabei beträgt die betriebsmäßige Induktion bei maximaler Ausgangsspannung 1,55 T. Zur Begrenzung einer möglichen Gleichspannungskomponente wurde deshalb ein neuartiges Erfassungs- und Regelungssystem entwickelt, das eine derartige Komponente rechtzeitig auf zulässig kleine Werte ausregelt.

**Auslegung des Zwischenkreises**

Der Gleichspannungszwischenkreis hat die Aufgabe, das Drehstromnetz und das Bahnnetz zu entkoppeln. Er soll den GTO-Umrichter mit einer möglichst konstanten Gleichspannung versorgen, aber auch Oberschwingungen des Bahnnetzes vom Drehstromnetz fernhalten. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die am GTO-Stromrichter hart angekoppelte, verteilte Kapazität  $C_D$  aus Schutzgründen minimal gehalten werden muß.

Als Folge der Einphasigkeit des Bahnnetzes tritt eine Leistungsoszillation doppelter Bahnnetzfrequenz auf. Im Zwischenkreis ist deshalb ein abgestimmtes 33-Hz-Filter eingebaut. Dessen Leistung ergibt sich aus der tolerierten Welligkeit der Gleichspannung bei maximaler Frequenzabweichung des Bahnnetzes und ungünstigster Fehlabstimmung des Filters.

Der Bahnstromumrichter muß auch bei relativ stark vorverzerrter Bahnspannung problemlos betrieben werden können. Insbesondere die dritte und fünfte Oberschwingung können hohe Werte annehmen. Vom Umrichter wird deshalb verlangt, daß er möglichst unempfindlich auf diese Oberschwingungen reagiert. Aus diesem Grund ist im Zwischenkreis zusätzlich zum 33-Hz-Filter ein gedämpftes Hochpaßfilter eingebaut.



**Umrichtermodule (1) mit Zwischenkreisschiene (2) und Zwischenkreiskondensatoren  $C_D$  (3)**

9

sind zudem so ausgelegt, daß die vorgeschriebenen Grenzen der Spannungsverzerrung ( $<1,5\%$ ) eingehalten werden.

Aus den Nenndaten des Zwischenkreises folgt für den Aufbau des Thyristor-

stromrichters einerseits eine Serienschaltung von vier Thyristoren, andererseits eine Parallelschaltung von drei Zweigen. Analog zum GTO-Stromrichter kann die Anlage bei Ausfall eines Thyristors pro

**Drehstromseitiger Stromrichter und Kompensationseinrichtungen**

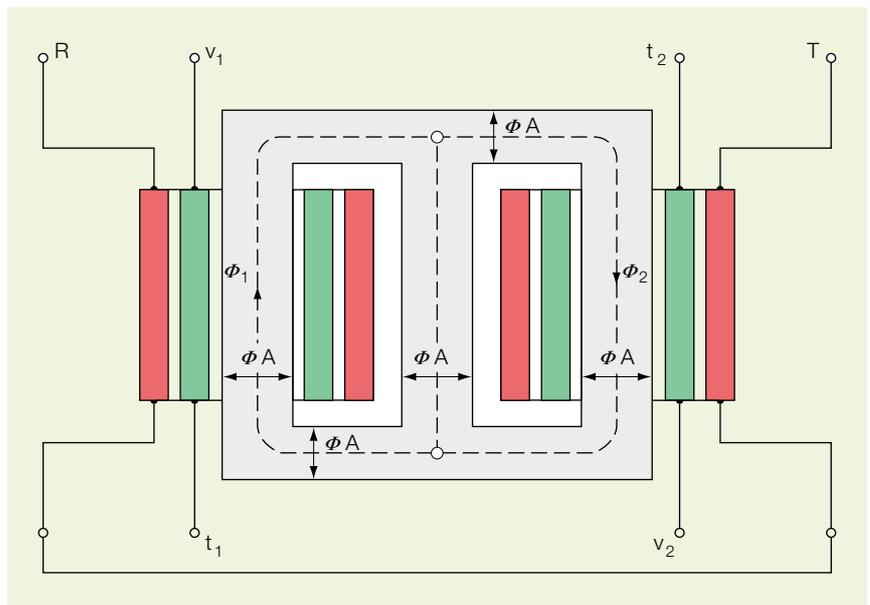
Die Einspeisung aus dem Netz der Stadtwerke Bremen erfolgt über einen netzgeführten 12-pulsigen Thyristorstromrichter. Gegenüber einem selbstgeführten Stromrichter stellt er eine wirtschaftlichere Lösung dar.

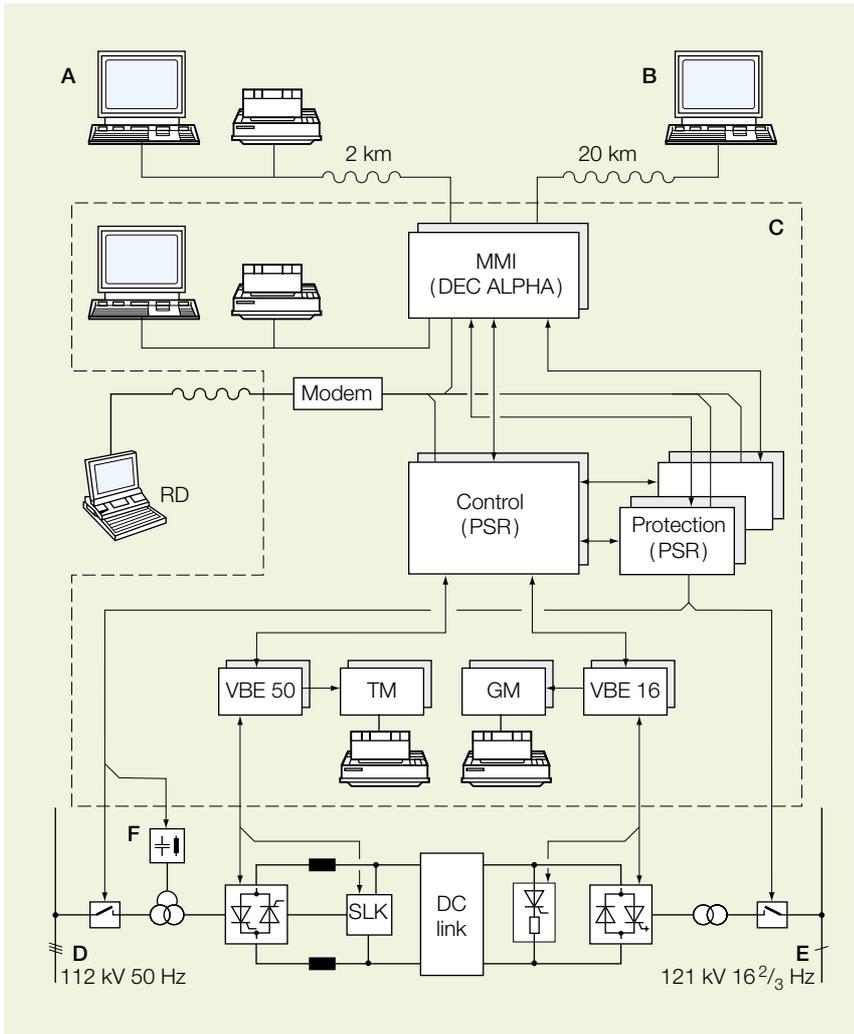
Wegen der starken Verkabelung des Netzes besteht ein Überschuß an Blindleistung. Bei Schwachlast muß dieser durch Reaktoren kompensiert werden. Die Drosselspulen können auch eingeschaltet bleiben, wenn die Frequenzkupplung nicht in Betrieb ist. Der geforderte Blindleistungsbereich wird auf wirtschaftliche Weise durch mechanisch geschaltete Filter und Reaktoren realisiert. Die Filter

**Schema einer Einheit des Summiertransformators**

10

R, T Phasen  $\Phi$  Induktionsfluß





**Hierarchie der Leittechnik**

- A Kraftwerk der Stadtwerke Bremen
- B Lastverteiler der Stadtwerke Bremen
- C Leittechnik der Frequenzkupplung
- D Schaltanlage der Stadtwerke Bremen
- E Schaltanlage der Deutschen Bahn
- F Filter

- MMI Mensch-Maschine-Interface mit DEC-Workstation basierend auf einem ALPHA-Prozessor
- RD Ferndiagnose
- PSR Programmierbares Schnelles Regelungssystem (Steuerung, Regelung und Schutz)
- VBE Stromrichternahe Elektronik der 50-Hz- bzw. 16<sup>2/3</sup>-Hz-Seite
- TM, GM Ausfallüberwachung, Protokollierung des Thyristor- bzw. GTO-Stromrichters
- SLK Summenlöschkreis
- DC Zwischenkreis (Gleichspannung)

Zweig uneingeschränkt weiterbetrieben werden. Fällt ein zweiter Thyristor im selben Zweig aus, so wird die Anlage abgeschaltet. Dabei besteht wiederum keine Gefahr für den gesunden Teil des Zweiges. Die korrekte Stromaufteilung zwi-

schen den parallelen Zweigen wird überwacht. Beteiligt sich ein einzelner Zweig nicht an der Stromführung (z. B. als Folge eines Fehlers in der Ansteuerung), so wird der Zwischenkreisstrom entsprechend begrenzt.

Wenn im Bahnnetz überschüssige Energie vorhanden ist, wird sie über einen zweiten, antiparallelen Thyristorstromrichter, der als Wechselrichter arbeitet, in das Netz der Stadtwerke Bremen eingespeist. Die Steuerung der Stromrichter erlaubt eine schnelle Leistungsumkehr.

Dem Schutz des Stromrichters im Wechselrichterbetrieb wurde besondere Beachtung geschenkt. Dazu dient der sogenannte Summenlöschkreis (SLK), eine statische Einrichtung zur Zwangskommutierung [1].

Im Gegensatz zu konventionellen HGÜ-Anlagen mit stromgeregelten Stromrichtern auf beiden Netzseiten läßt sich der Kippstrom in der vorliegenden Schaltung im Zwischenkreis nicht kontrollieren. Auch bei vorsichtiger Auslegung der Wechselrichtersteuerung (Löschwinkel) können Kommutierungsfehler, z. B. bei transienten Vorgängen im Drehstromnetz, nie ganz ausgeschlossen werden.

Das Wechselrichterkippen wird durch zwei unabhängige Meßkreise erfaßt. Unmittelbar danach werden beide Stromrichter blockiert. Dem fehlerhaft leitenden Wechselrichterventil wird ein negativer Gegenstrom aufgeprägt, der dieses löscht. Der gesamte Löschvorgang nimmt ca. eine Netzperiode in Anspruch. Nach einer kurzen für die Wiedererstellung der Löschbereitschaft erforderlichen Zeit von etwa 1 s wird der Übertragungsbetrieb automatisch wieder aufgenommen. Die ordnungsgemäße Funktionsbereitschaft des SLK wird dauernd überwacht.

**Stromrichternahe Elektronik**

Jeder Stromrichter verfügt über eine stromrichternahe Elektronik. Diese erzeugt aus den Zündbefehlen der Regelung die Impulstelegramme, die über Lichtwellenleiter an die einzelnen Halbleiterplätze weitergeleitet und dort von der Thyristorelektronik in elektrische Zündimpulse umgewandelt werden (indirekte Lichtzündung). Sie überwacht ferner mit Hilfe von Rückmeldungen der Thyristorelektronik die Redundanz der in Serie geschalteten Halbleiter und erzeugt bei Redundanzab-

bau ein Alarm- bzw. Auslösesignal. Ausgefallene Halbleiter werden erfaßt und bei der nächstfolgenden Wartung ausgetauscht.

Zusätzlich wird beim GTO-Stromrichter der Überspannungsbegrenzer im Zwischenkreis von der stromrichternahen Elektronik angesteuert. Diese sorgt ferner für eine schnelle redundante Erfassung von Durchzündungen sowie für die Auslösung der Schutzzündung des GTO-Stromrichters.

Beim Thyristorstromrichter steuert diese Elektronik auch den Summenlöschkreis (SLK) an. Deren Rückmeldungen erlauben es der Regelung, Kommutierungsfehler im Wechselrichterbetrieb sehr schnell zu erfassen.

**Leittechnik**

Zur Bedienung und Überwachung der Anlage sowie zur Protokollierung von Zustandsänderungen und Störungen dient ein modernes MMI-System (S.P.I.D.E.R. MicroSCADA) basierend auf einer ALPHA Workstation **11**. Die Bedienung kann von einer lokalen Warte, vom nahegelegenen Kraftwerk Mittelsbüren oder vom ca. 20 km entfernten Lastverteiler der Stadtwerke Bremen erfolgen, wobei man die Bedienerhoheit beliebig festlegen kann. Die Anlage selbst wird unbesetzt betrieben.

Die Steuerung und Regelung sowie der Schutz der Frequenzkupplung basieren auf dem System PSR2 (Programmierbares Schnelles Regelungssystem) von ABB [5]. Dieses Leitsystem wurde speziell für komplexe leistungselektronische Systeme entwickelt und eignet sich deshalb hervor-

ragend für die Frequenzkupplung Bremen. Es vereint eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit mit einer sehr anwenderfreundlichen graphischen Programmiersprache (FUPLA 2). Die Kombination dieser beiden Eigenschaften erlaubt ein hohes Maß an Flexibilität. Für Diagnosezwecke kann auch über eine Telefonleitung auf die graphische Programmieroberfläche des Systems und auf das MMI-System zugegriffen werden.

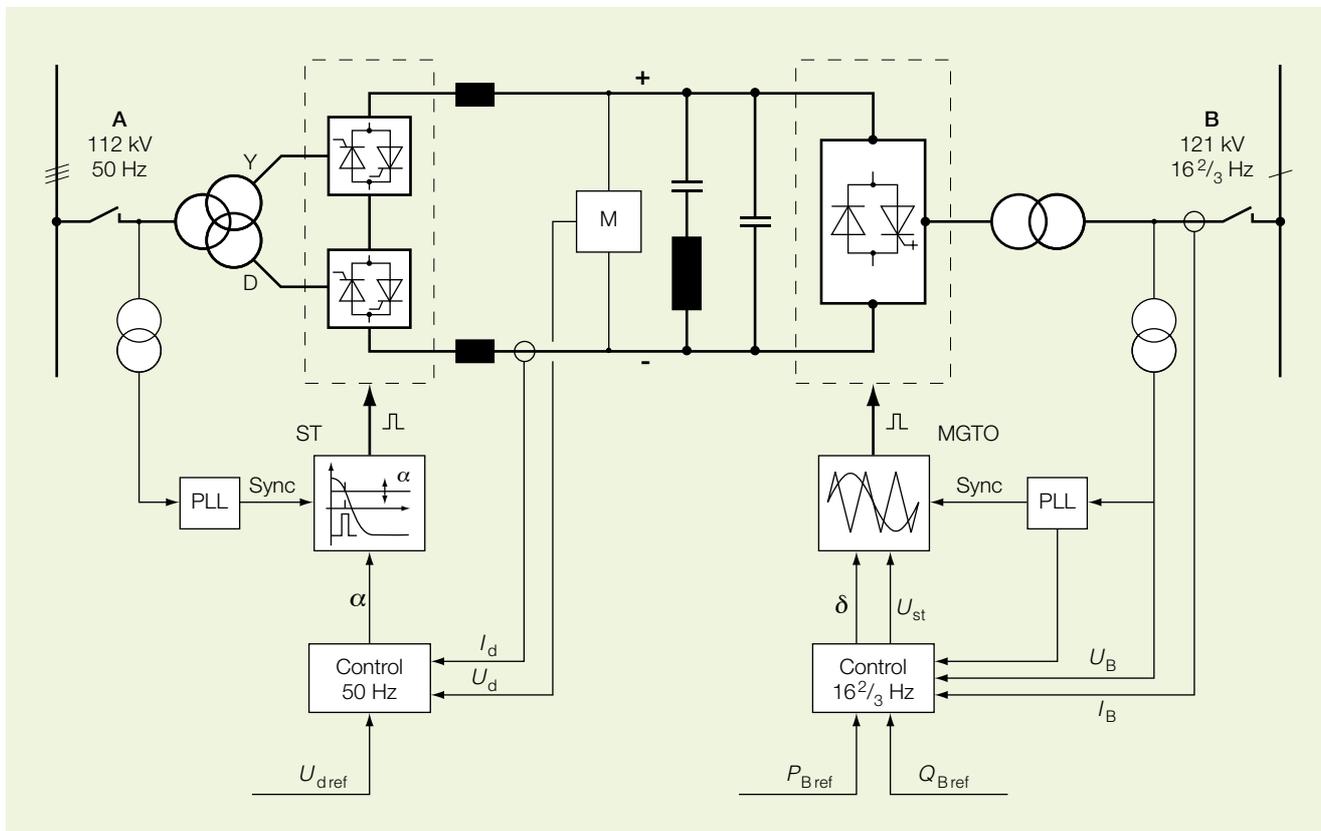
Die Steuerung ist verantwortlich für die An- und Abfahrsequenzen der Anlage, die Regelung für einen stabilen Betrieb. Das Regelungskonzept ist in **12** vereinfacht dargestellt.

Die Regelung der 50-Hz-Seite hat im wesentlichen die Aufgabe, die Zwischenkreis-Gleichspannung konstant zu halten. Zur Optimierung der Dynamik

**Vereinfachtes Regelungskonzept der 100-MW-Frequenzkupplung**

**12**

A Drehstromseite	M Messungen	$U_d, I_d$ Spannung und Strom im Zwischenkreis
B Bahnnetzseite	ST Steuersatz des Thyristorstromrichters	$U_{st}, \delta$ Steuerspannung und Phasenwinkel (Stellgrößen)
$\alpha$ Zündwinkel	MGTO Modulator des GTO-Umrichters	$U_B, I_B$ Bahnnetzseitige Spannung und Strom
	PLL Phasenregelkreis	$U_{dref}, P_{Bref}, Q_{Bref}$ Referenzwerte von Spannung und Leistung





**Leittechnikschränke der Frequenzkupplung Bremen**

- 1 PSR-Rechen- und -Interfacegeräte
- 2 Modulator des bahnseitigen Umrichters (MGTO) und I/O-Geräte
- 3 Steuersatz des Thyristorstromrichters (ST) und Interface der Lichtwellenleiter
- 4 Verschiedene Überwachungs- und Speisegeräte
- 5 Lokale Bedientafel

und aus Schutzgründen wurde dies mit einer Kaskadenregelung mit überlagertem Spannungsregler und unterlagertem Gleichstromregler realisiert. Ferner steuert die Regelung der 50-Hz-Seite die Umschaltung der Thyristorstromrichter im Falle einer Leistungsumkehr. Der Steuersatz ist, wie auch bei HGÜ-Anlagen üblich, über einen Phasenregelkreis (PLL) synchronisiert.

Auf der Bahnseite werden der Strom ( $I_B$ ) und die Spannung ( $U_B$ ) gemessen. Aus diesen Größen werden die Wirk- und die Blindleistung berechnet. Die Wirkleistung wird nach einer Frequenz-Leistungskennlinie, die Blindleistung nach einer Spannungs-Blindleistung-Kennlinie geregelt. Zur Synchronisation des PWM-Modulators dient ein Phasenregelkreis (PLL), der gleichzeitig zur Messung der Bahnfrequenz verwendet wird.

Der Schutz ist als zweikanalig voll-redundantes System ausgeführt. Fällt ein System als Folge eines Gerätefehlers aus, werden seine Auslösekanäle automatisch

blockiert. Der Anlagenschutz bleibt dabei uneingeschränkt sichergestellt. Der Fehler wird mit Angabe des defekten Geräts via MMI-System an das Bedienpersonal gemeldet. Der Ersatz von Geräten, die Parametrierung und die Prüfung der Schutzfunktionen können an jedem Schutzsystem bei laufender Anlage durchgeführt werden.

**Auslegung und Verifikation**

Auslegung und Verifikation der Frequenzkupplung Bremen erfolgten unter Verwendung von drei qualitativ unterschiedlichen Werkzeugen in folgender Reihenfolge:

- analytische Computerprogramme
- simulative Computerprogramme
- physikalische Simulation mittels des auf 50 W skalierten Simulators von ABB

Während die ersten beiden Werkzeuge den Vorzug hoher Genauigkeit und Reproduzierbarkeit über einen großen Frequenzbereich aufweisen, liegt die besondere

Stärke des Simulators in seiner Echtzeitfähigkeit und der damit verbundenen Möglichkeit, das gesamte System gefahrlos mit der Original-Leittechnik zu testen.

So hat man die wesentlichen Funktionen der Leittechnik am physikalischen Simulator mit den Zwischenkreisgrößen 200 V / 250 mA entwickelt. Vor der Auslieferung wurden die Leittechnikschränke **13** in den Simulatorenbau eingebunden und in Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Bremen unter möglichst realistischen Normal- und Störungsbedingungen getestet.

**Inbetriebsetzung**

Bei der Inbetriebnahme wurde auf ein schrittweises Vorgehen zur Verifikation der korrekten elektrischen, thermischen und mechanischen Auslegung aller Anlagenteile großer Wert gelegt. Anschließend an die üblichen Tests vor der Inbetriebsetzung (Spannungsprüfungen, Tests an Leittechnik und Schutz usw.) wurden die Subsysteme, beginnend bei der drehstromseitigen Einspeisung, in folgender Reihenfolge getestet:

- *Leerlaufversuch der drehstromseitigen Einspeisung*  
Filter- und Kompensationseinrichtungen, der Stromrichtertransformator, der Thyristorstromrichter und der Gleichspannungszwischenkreis wurden zum ersten Mal unter Spannung gesetzt. Durch hochohmige Belastung des Stromrichters wurden auch die stromrichternahen Leittechnikkomponenten (z.B. der Steuersatz) geprüft.
- *Kurzschlußversuch der drehstromseitigen Einspeisung*  
Mit einem Dauerversuch bei maximalem Gleichstrom von 10,5 kA hat man die korrekte thermische Auslegung aller beteiligten Subsysteme und insbesondere auch der 50-Hz-Kühlanlage nachgewiesen. Ferner wurden die Regelung und die stromrichternahe Leittechnik des Thyristorstromrichters getestet.
- *Leerlaufversuch des GTO-Stromrichters*  
Die Spannungsbildung des GTO-Stromrichters wurde vorerst mit redu-

zierter Zwischenkreisspannung und offenem bahnseitigem Leistungsschalter getestet.

• *Schutztests*

Vitale Schutzfunktionen, wie Schutzzündungen des GTO-Stromrichters, Überspannungsbegrenzung im Zwischenkreis und die SLK-Funktion bei Wechselrichterkippen, wurden unter realen Bedingungen getestet.

• *Kurzschlußversuch des GTO-Stromrichters*

Mit einem Dauerversuch bei kurzgeschlossener Bahnnetzseite und maximalem Laststrom entsprechend 100 MVA wurde die korrekte thermische Auslegung des Stromrichters, des bahnseitigen Transformators und der Kühlanlage nachgewiesen.

• *Systemversuche am Bahnnetz*

Im Rahmen dieser Versuche hat man die Regelung der Anlage unter realen

Betriebsbedingungen getestet und optimiert. Ferner wurden alle Garantiewerte, wie Leistungsdaten, Wirkungsgrad und Netzurückwirkungen, nachgewiesen.

Das Oszillogramm **14** zeigt als Beispiel die Zwischenkreisspannung ( $u_d$ ), den Zwischenkreisstrom ( $i_d$ ) sowie die Spannung ( $u_B$ ) und den Strom ( $i_B$ ) im Anschlußpunkt des Bahnnetzes beim Umschalten vom normalen Übertragungsbetrieb in den Phasenschieberbetrieb. Diese Sequenz wird automatisch eingeschaltet, wenn das Drehstromnetz gestört ist. Im rechten Teil des Oszillogramms ist die entsprechende Umkehrsequenz dargestellt. Auch diese wird selbsttätig ausgeführt, sobald das Drehstromnetz wieder verfügbar ist. Nach erfolgreich abgeschlossenem Probebetrieb konnte die Frequenzkupplung den Stadtwerken Bremen zum kommerziellen Betrieb übergeben werden.

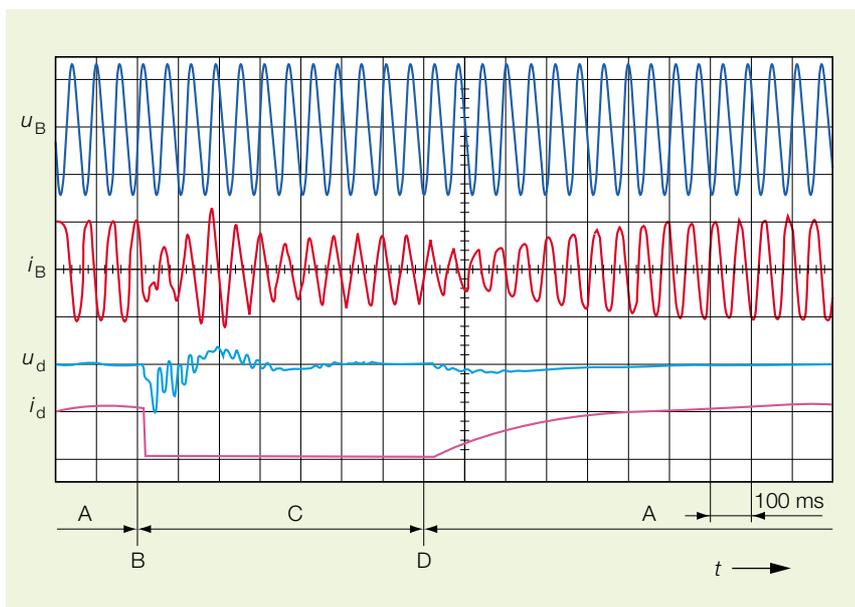
**Literaturhinweise**

[1] Gaupp, O.; Linhofer, G.; Lochner, G.; Zanini, P.: Leistungsstarke statische Frequenzumrichter für den Bahnverkehr durch die Alpen. ABB Technik 5/95, 4–10.  
 [2] Lönard, D.; Northe, J.; Wensky, D.: Statische Bahnstromrichter – Systemübersicht ausgeführter Anlagen. Elektrische Bahnen 6/95, 179–190.  
 [3] Mathis, P.: Statischer Umrichter Giubiasco der Schweizerischen Bundesbahnen. Elektrische Bahnen 6/95, 194–200.  
 [4] Steimer, P.; Grüning, H.; Werninger, J.; Dähler, P.; Linhofer, G.; Boeck, R.: Serienschaltung von GTO-Thyristoren für Frequenzumrichter hoher Leistung. ABB Technik 5/96, 14–20.  
 [5] Steimer, P.; Hartmann, P.; Perrin, Ch.; Rufer, A.: PSR – das weltweit schnellste, nach Funktionsplan programmierbare Regelungssystem. ABB-Technik 2/93, 21–28.

**Oszillogramm einer Kurzunterbrechung von 700 ms auf der 50-Hz-Seite 14**

- A Leistungsübertragung in das Bahnnetz: 121 kV, 30 MW, 20 MVA<sub>r</sub> untererregt
- B Abschaltung des Thyristorstromrichters, automatisches Umschalten auf Phasenschieberbetrieb
- C Drehstromseite ausgeschaltet: Phasenschieberbetrieb mit 20 MVA<sub>r</sub> untererregt
- D Wiedereinschalten der Drehstromseite, automatisches Hochfahren der Wirkleistung

$u_B$  Bahnspannung  
 $i_B$  Bahnstrom  
 $u_d$  Zwischenkreisspannung 10 kV, 1 Skalenteil = 1,3 kV  
 $i_d$  Zwischenkreisstrom



**Redaktionelle Bearbeitung**

Dr. Hans-Peter Eggenberger  
 Meilen/Schweiz

**Adressen der Autoren**

Rüdiger Boeck  
 Stadtwerke Bremen AG  
 Theodor-Heuss-Allee 20  
 D-28215 Bremen  
 Telefax: +49 (0) 421 359 2081

Osvin J. Gaupp  
 Peter Dähler  
 Eugen Bärlocher  
 Johannes Werninger  
 ABB Industrie AG  
 CH-5300 Turgi/Schweiz  
 Telefax: +41 (0) 56 299 2579

Plinio Zanini  
 ABB Kraftwerke AG  
 Postfach  
 CH-5401 Baden/Schweiz  
 Telefax: +41 (0) 56 466 6681