

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 100 (1982)
Heft: 43

Artikel: Leistungselektronik in Triebfahrzeugen
Autor: Kocher, Eric
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-74888>

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: 15.01.2026

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

Leistungselektronik in Triebfahrzeugen

Von Eric Kocher, Mannheim

Die elektrischen Antriebe der Traktion, d. h. von Eisenbahntriebfahrzeugen aller Art sowie Trolleybussen, sind eine dankbare Anwendung der Leistungselektronik, deren Vorteile hier ganz besonders hervortreten.

Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung beim *Traktionsantrieb* ist die *Erzeugung eines variablen Drehmomentes bei variabler Geschwindigkeit am Triebrad*: ist der Fahrmotor ein *Kommutatormotor*, so muss ihm eine variable Spannung, ist er ein *Drehstrommotor*, eine variable Frequenz und Spannung zugeführt werden. Das Triebrad überträgt seine Umgangskraft auf die Schiene. Die Höhe der übertragbaren Kraft ist das Produkt aus Radlast und Adhäsionsfaktor μ , der örtlich und zeitlich in sehr weiten Grenzen variiert. Diese Eigenschaft ist ein ganz charakteristisches Merkmal des Traktionsantriebes und verlangt vom Antriebssystem eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit. Die Energierichtung des Vorganges kann auch umgekehrt werden, d. h. beim Bremsen arbeitet der Fahrmotor als Generator.

Aus historischen Gründen – die technische Entwicklung begann am Ende des 19. Jahrhunderts – werden elektrische Bahnen mit ganz verschiedenen Arten von elektrischem Strom versorgt:

- Gleichstrom von 600 V–3000 V Spannung,
- Einphasen-Wechselstrom relativ hoher Spannung mit niedriger Fre-

quenz (15 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz) oder mit Industriefrequenz (25 kV, 50 oder 60 Hz).

Das letztgenannte Stromsystem, nämlich *Einphasen-Wechselstrom* von 25 kV/50 oder 60 Hz, wird heute bei *Neuelektifizierungen* von Vollbahnen fast ausschliesslich angewendet, aber die anderen Systeme sind sehr weit verbreitet und werden zum Teil weiter ausgebaut. Es ist also notwendig, für alle diese Speisesysteme Lösungen bereit zu halten.

Bis zur Einführung der Leistungselektronik war, von einigen Ausnahmen aus der Anfangszeit abgesehen, nur die Kommutatormaschine als Antriebsmotor verbreitet. Bei den konventionellen Lösungen (also ohne Zuhilfenahme der Leistungselektronik), die aus Kontinuitätsgründen heute noch gebaut werden, wird die Motorspannung durch Vorschalten eines veränderlichen Widerstandes bei Gleichstromtraktion beziehungsweise durch Anzapfungen eines Stufentransformators bei Wechselstromtraktion mit Einphasen-Kommutatormotor («Direktmotor») verändert. Diese konventionellen Lösungen arbeiten mit elektromechanischen, dem Verschleiss unterworfenen Geräten und erlauben keine stufenlose Veränderung der Motorspannung und damit des

Drehmomentes. Es ergeben sich also beim Anfahren *Zugkraftsprünge*, die den Fahrkomfort beeinträchtigen.

Technische Lösungen

Aus der Palette unterschiedlicher Stromrichter können nun für alle Aufgaben und alle Stromsysteme der Traktionstechnik passende leistungselektronische Stellglieder ausgewählt werden: Wir unterscheiden zwischen den Lösungen mit dem *Gleichstrom-Kommutatormotor als Antriebsorgan* und denen mit dem einfacheren *Asynchron-Kurzschlussläufermotor*. Hand in Hand mit den Fortschritten bei Halbleitern und in der Stromrichtertechnik kamen zuerst die Lösungen mit Gleichstrom- oder Mischstrom auf.

Lösungen mit Gleichstrom- (oder Mischstrom)-Fahrmotoren

Gleichstrombahnen

Mit Gleichstrom betrieben werden *Nahverkehrsnetze* aller Art, von *Trolleybussen* und *Strassenbahnen* bis zu *Untergrundbahnen* (meist 600 bis 750 V), aber auch Fernbahnen (1500 V und 3000 V).

Hier verwendet man *Gleichstromsteller* (*Chopper*), (Bild 1). Sie verwandeln eine sich in vorgegebenen Grenzen haltende Gleichspannung durch Zerhacken in eine Ausgangsspannung, die sich mit der Steuerung (durch Fahrer oder Automatik) beliebig und stufenlos verändert lässt, und führen diese dem Gleichstrom-Fahrmotor zu.

BBC hat zahlreiche Gleichstromsteller-Ausrüstungen für die verschiedensten Anwendungen in aller Welt, auch für

Bild 2. Stadtbahnwagen Cleveland



Bild 1. Blockschaltbild Gleichstromsteller

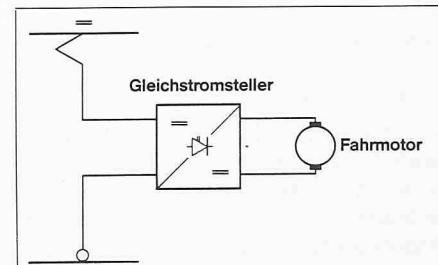
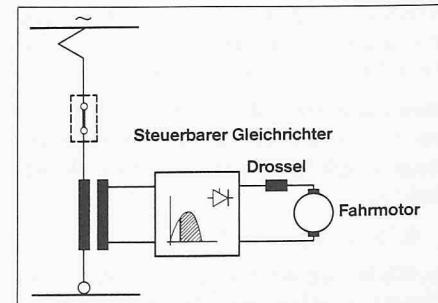


Bild 3. Blockschaltbild Anschmittsteuerung



leistungsstarke Lokomotiven für 3000-V-Betrieb, ausgeführt und im Bau; z. B. Stadtbahnwagen für Cleveland/Ohio, USA (Bild 2).

Wechselstrombahnen

Die Bahnen in der Schweiz, in Deutschland, Österreich, Norwegen und Schweden werden mit *Einphasen-Wechselstrom* 15 kV/16 2/3 Hz betrieben. Die bisher übliche Kombination von Stufentransformator und Einphasen-Reihenschluss-Kommutatormotor (der von Brown Boveri bis zu sehr hohen Leistungen durchentwickelt wurde) kann ersetzt werden durch einen *steuerbaren Einphasen-Gleichrichter* («Anschnittsteuerung») und einen sogenannten *Mischstrommotor* (Bild 3). Die Ausgangsspannung des Gleichrichters wird durch Verstellen des Zündpunktes kontinuierlich verändert und enthält Oberwellen. Der Leistungsfaktor dieser Schaltung ist schlechter als bei der konventionellen Lösung, kann aber durch spezielle Schaltungen in erträglichen Grenzen gehalten werden. Die je Achse mögliche Leistung ist grösser, und die Mischstrommotoren sind robuster, einfacher und leichter. Brown Boveri hat hier einen hohen Stand der Technik erreicht und auch Hochleistungslokomotiven mit Anschnittsteuerungen ausgerüstet, z. B. die Lokomotive Reihe 1044 oder OeBB und die neue Lokomotive Serie Re 4/4 IV der SBB (Bild 4). Die in den letzten Jahren neu errichteten elektrischen Bahnsysteme mit 50 und 60 Hz Speisung haben ausschliesslich Triebfahrzeuge mit Anschnittsteuerung.

Lösungen mit Drehstrom-Fahrmotoren

Es war schon immer der Wunschtraum der Traktionsingenieure, die einfachste aller elektrischen Maschinen, nämlich den *Drehstrom-Asynchron-Kurzschlussläufermotor* als Fahrmotor zu verwenden. Dieser Traum scheiterte bis zur Einführung der Leistungselektronik am Problem, diesen Motor in der Drehzahl zu regeln. Die modernen *Hochleistungthyristoren* mit kurzer Freiwerdezeit erlauben aber heute, auf wirtschaftliche Weise *Wechselrichter* zu bauen, die eine Ausgangsspannung mit stetig veränderlicher Amplitude wie Frequenz abgeben (Bild 5). BBC hat sich mit dieser Traktionsantriebstechnik sehr früh und intensiv befasst und nimmt heute auf diesem Sektor eine Spitzenstellung ein.

An sich sind verschiedene Arten von Wechselrichtern denkbar. Das Unternehmen hat zunächst, im Blick auf die im Vordergrund stehenden Diesellokomotiven und Wechselstrom-Triebfahrzeuge für 15 kV/16 2/3 Hz, einen *Wechselrichter* konstruiert, der von einem Gleichspannungszwischenkreis kon-



Bild 4. Lokomotive Serie Re 4/4 IV der Schweizerischen Bundesbahnen. Prototypen

stanter Spannung gespeist wird. Diese Lösung bietet wesentliche Vorteile, u. a. bei schweren Anfahrten, wo es auf schnelle Dynamik des Systems ankommt. Bild 6 zeigt die Art und Weise, wie – mittels des sogenannten *Unterschwingungsverfahrens* – von einer Gleichstrom-Sammelschiene aus eine dreiphasige, in Amplitude und Frequenz variable Spannung erzeugt werden kann. Der Wechselrichter wirkt als Schalter, der getaktet jeweils an die Plus- und an die Minusschiene angeschlossen wird.

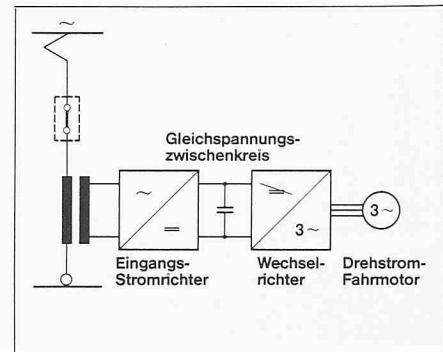
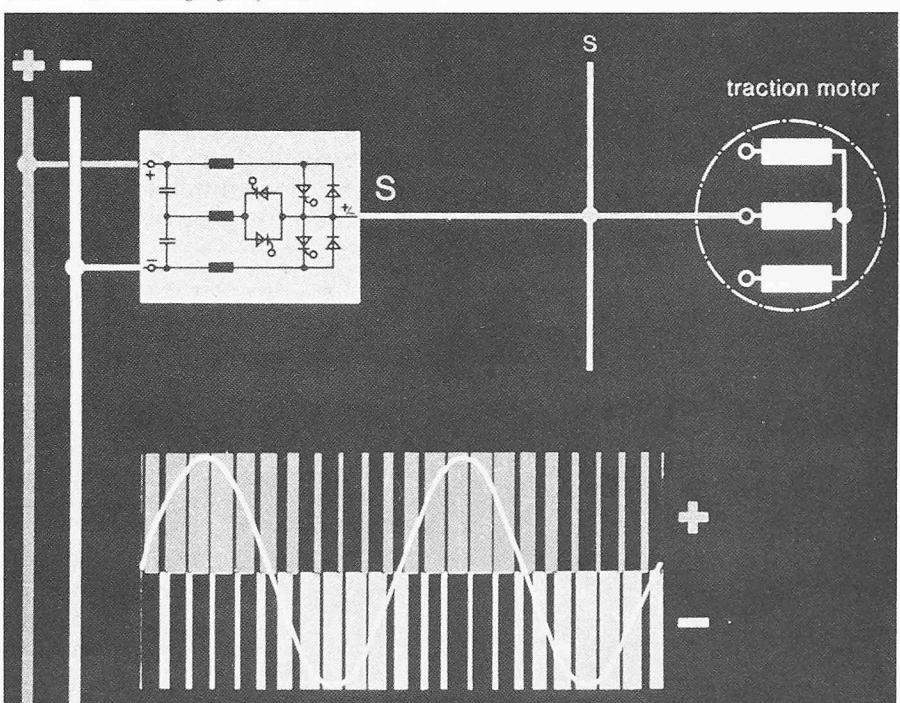


Bild 5. Blockschaltbild Drehstromantrieb

Bild 6. Unterschwingungsverfahren



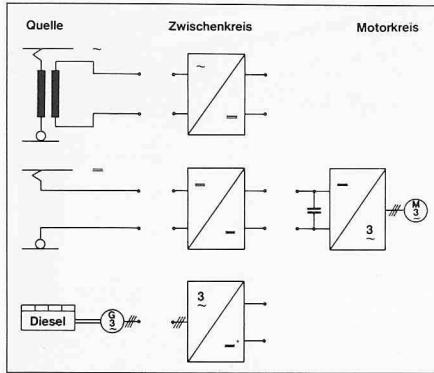


Bild 7. Verschiedene Einspeisungsverfahren

stellt (Bild 8; drei verschiedene Lokomotiven mit identischen Wechselrichtern und Fahrmotoren).

Nachdem die Funktionsfähigkeit des Drehstromantriebs Anfang der 70er Jahre erwiesen war, fand dieses System in allen Traktionsgebieten Eingang, von der kleinen gleichstromgespeisten Tagebauulokomotive über kleine und grosse Diesellokomotiven sowie schwere elektrische Rangierlokomotiven bis hin zu Hochleistungslokomotiven von 5600 kW Leistung und 200 km/h Höchstgeschwindigkeit (Bilder 9-12).

nannten *Vierquadrantensteller*, der am Netz den idealen Leistungsfaktor Eins herstellt und überdies ohne Mehraufwand Nutzbremsung mit voller Kraft bis zum Stillstand erlaubt.

Vorteile: Leistungselektronik – konventionelle Technik

Allen aufgeführten elektronischen Lösungen sind folgende Vorteile gemeinsam:

- im Stellglied keine beweglichen, mechanischen oder elektrischen Verschleiss unterworfenen Teile;
- die Möglichkeit, die Zugkraft (und gegebenenfalls die elektrische Bremskraft) der Triebfahrzeuge stufenlos zu verändern;
- rasche Eingriffsmöglichkeit in das Stellglied bei Wechsel der Adhäsionsverhältnisse zwischen Rad und Schiene, mithin höhere mittlere Ausnutzung des Adhäsionsfaktors.

Bei Gleichstrombahnen ermöglicht der Gleichstromsteller die Nutzbremsung. Bei Wechselstrombahnen erlaubt die Anschnittsteuerung mit Mischstrommotoren höhere Leistung je Achse. Das Motordrehmoment ist gleichförmiger als bei Einphasen-Reihenschluss-Kommutatormotoren, was sich positiv auf die Ausnutzung der Reibung auswirkt.

Beim *Drehstromantrieb* ergeben sich zusätzlich noch folgende Vorteile:

- Einfache, robuste und leichte kommutatorlose Fahrmotoren, d. h. kein Verschleiss (ausser bei Lagern), höhere Leistung je Achse, leichtere Drehgestelle (dadurch Schonung des Oberbaus).
- Ausnutzung der vollen Leistung bis zur Höchstgeschwindigkeit (Leistungshyperbel, Bild 13); dies ermöglicht eine universelle Verwendung der Triebfahrzeuge.
- Nutzbremsung mit voller Kraft bis zum Stillstand mit der von BBC entwickelten Eingangsschaltung (4 QS).

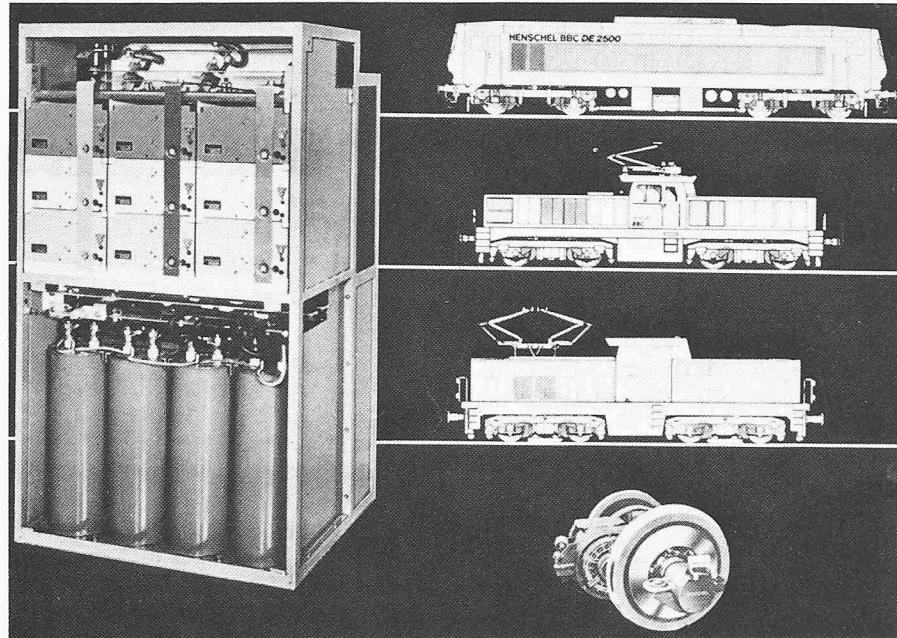


Bild 8. Drei verschiedene Lokomotiven mit einheitlichem Antriebssystem.

Dieses System mit *Gleichspannungszwischenkreis* eignet sich für alle Arten von Einspeisungen, also für alle möglichen Bahnsysteme, wobei es ab dem Zwischenkreis und einschliesslich Fahrmotor identisch bleibt (Bild 7). Insbesondere kommt es auch für die *dieselektrische* Leistungsübertragung in Frage, von der bisher noch nicht die Rede war, die aber hinsichtlich Volumen den grössten Markt im Traktionssektor

Der BBC-Konzern hat über 160 Triebfahrzeuge aller Art mit Drehstromantrieb ausgerüstet oder in Auftrag.

Bei fahrdrähtgespeisten Fahrzeugen wird dem Zwischenkreis ein Eingangsglied vorgeschaltet, das unabhängig von den Netzverhältnissen für eine konstante Spannung am Zwischenkreis sorgt. Bei Wechselstromspeisung verwendet man vorzugsweise den soge-

Bild 9. Schwere Rangierlokomotive Ee 6/6 der Schweizerischen Bundesbahnen; 1000 kW Leistung

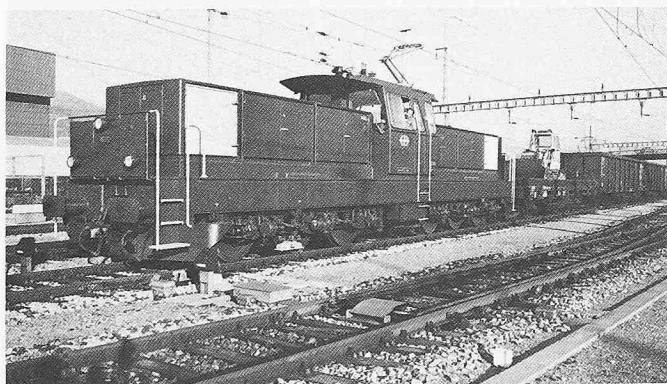


Bild 10. Diesel-Industrie-Rangierlokomotive DE 500, 500 kW Leistung





Bild 11. Diesellokomotive Di 4 der Norwegischen Staatsbahn; 3800 PS (2795 kW)

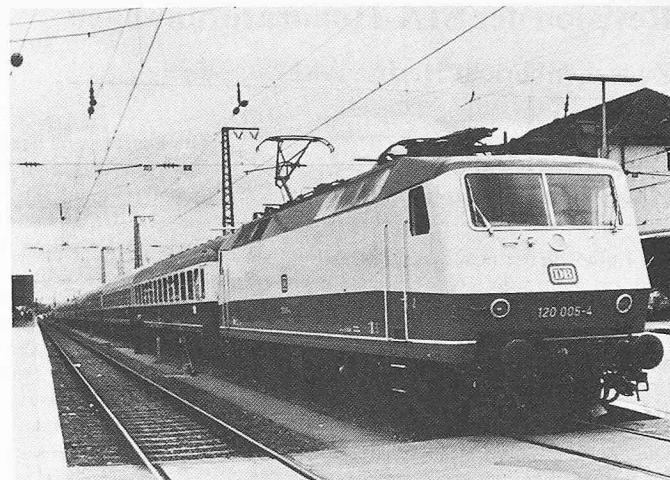


Bild 12. Elektrische Lokomotive der Deutschen Bundesbahn für Schnell- und Güterzüge, Reihe E 120, 5600 kW, v_{max} : 200 km/h mit Nutzbremsen

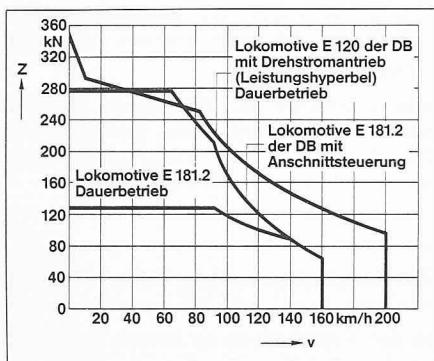


Bild 13. Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm

- Ausübung der Anfahrzugkräfte (maximale Zugkräfte) ohne zeitliche Begrenzung.
- Leistungsfaktor 1 am Netz bei Wechselstrombahnen und geringer Oberwellengehalt mit der Eingangsschaltung (4 QS).
- Fortgeschrittene Modularität, z.B. identische Wechselrichtereinheiten bei Diesel-Rangierlokomotiven 700PS und grossen Diesellokomotiven 4000PS (Bild 14).

Die zahlreichen Vorteile des Drehstromantriebes werden erkauft durch einen höheren Aufwand an Leistungs- und Steuerelektronik. Wie die rasch zunehmende Verbreitung dieser Lösung in der ganzen Welt aber zeigt, wird in den Augen der Kunden dieser Mehraufwand durch die genannten Vorteile mehr als wettgemacht.

Zukünftige Entwicklungsrichtungen und Aussichten

Die Weiterentwicklung der Halbleiter in Richtung höherer Daten (z.B. der rückwärtsleitende Thyristor) wird die Stellglieder vereinfachen, verbilligen und ihr Volumen wie Gewicht reduzieren.

Bei der Traktion wurde bisher Luft- oder Öl Kühlung angewendet (Bild 15).

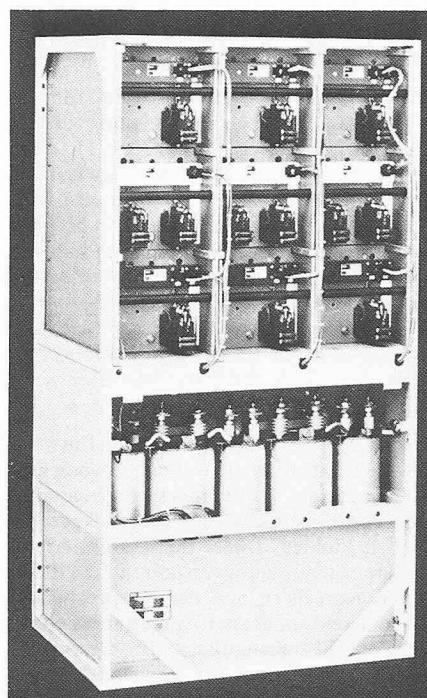


Bild 14. Wechselrichtereinheit (Modul) für Drehstromantriebstechnik

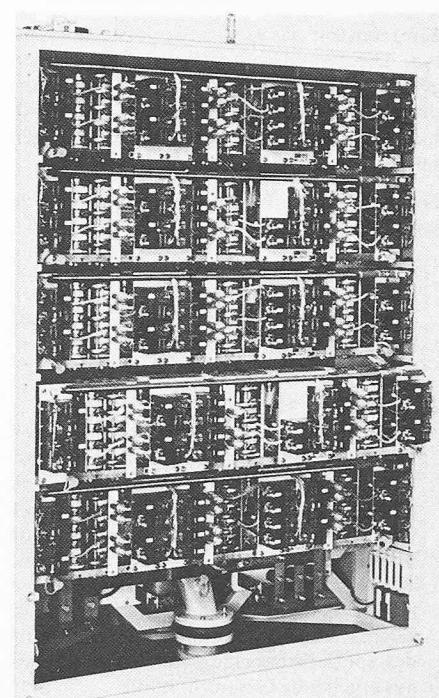


Bild 15. Ölgekühlter Stromrichter der Drehstromlokomotive E 120

Neue, auch von Brown Boveri entwickelte Kühlverfahren, z.B. Freon, machen günstigere Module möglich, die noch vielseitiger verwendbar sind als die bisherigen. Diese Tendenzen favorisieren jene Antriebssysteme, bei denen der leistungselektronische Anteil hoch ist, in unserem Fall die Drehstromantriebe.

Fortschritte bei der Steuer- und Regel-elektronik, insbesondere die Anwendung von Mikroprozessoren, tragen zur weiteren Verbreitung der Leistungselektronik bei, weil sie den Gesamtaufwand verringern und die Zuverlässigkeit im Betrieb, dank Verminderung der Anzahl Elemente, erhöhen. Bereits sind von BBC ausgerüstete elektrische Lokomotiven mit Mikroprozessorsteuerung in Betrieb.

Kurzum: in wenigen Jahren wird man für Traktionsantriebe nur noch leistungselektronische Stellglieder verwenden, wobei der Drehstromtechnik vermehrte Bedeutung zukommt. Es erscheint deshalb folgerichtig, dass die Firma sehr intensiv an der Weiterentwicklung der Leistungselektronik für alle Anwendungsbereiche der Traktion arbeitet.

Nach einem Vortrag, gehalten an den internationalen Pressetagen von BBC Baden (10./11. März 82)

Adresse des Verfassers: E. Kocher, dipl. Ing., Direktor, Leiter Geschäftsbereich Verkehr, Brown, Boveri & Cie Aktiengesellschaft, D-6800 Mannheim 31.