Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 95 (1977)
Heft: 15

Artikel: Die dieselelektrischen Lokomotiven Am6/6 der Schweizerischen Bundesbahnen
Autor: Gerber, Martin / Müller, Max / Winter, Peter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-73359

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: 10.07.2025

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

Die dieselelektrischen Lokomotiven Am6/6 der Schweizerischen Bundesbahnen

Von **Martin Gerber, Max Müller** und **Peter Winter,** Bern[1])

Elektrische Leistungsübertragung und Hilsbetriebe

Gesamtkonzept

Leistungsübertragung im Fahr- und Bremsbetrieb

Den prinzipiellen Aufbau des Leistungsstromkreises zeigt Bild 16. Im Fahrbetrieb gelangt die Energie vom Drehstrom-Hauptgenerator (2) über die Trennhüpfer (3) und die Zwischenkreisgleichrichter (4) in den Gleichstrom-Zwischenkreis mit dem Stützkondensator (7). Dessen Spannung beträgt beim Fahren im ganzen Betriebs-Drehzahlbereich des Dieselmotors 1500 V. Mit den Wechselrichtern (10) wird die Gleichspannung erneut in eine dreiphasige Wechselspannung umgeformt und den Fahrmotoren (12) zugeführt. Über die Wechselrichter-Steuerung kann sowohl die Amplitude als auch die Frequenz dieser Spannung in weiten Grenzen variiert werden.

Im Bremsbetrieb speisen die Wechselrichter die Energie von den Fahrmotoren in den Gleichstrom-Zwischenkreis, wo sie durch den Bremswiderstand (9) in Wärme umgesetzt wird. Die Einschaltung der vier Teilwiderstände erfolgt durch gestaffeltes Zünden der zugehörigen Schaltthyristoren. Für ihre Löschung wird der Zwischenkreis durch Öffnen der Trennhüpfer kurzzeitig spannungslos gemacht. Der Hauptgenerator ist im Bremsbetrieb derart erregt, dass die Zwischenkreisspannung nicht unter 800 V absinken kann (solange die Wechselrichter eine höhere Spannung abgeben, fliesst infolge der Entkopplung durch den Zwischenkreis-Gleichrichter kein Strom vom Hauptgenerator in den Bremswiderstand).

Schutzeinrichtungen, zweiteiliger Schaltungsaufbau

Zum schadlosen Ableiten der im Zwischenkreiskondensator und in den Fahrmotoren gespeicherten Energie dienen Thyristorkurzschliesser, die im Störungsfall gemeinsam mit sämtlichen Wechselrichter-Hauptventilen und den Trennhüpfern nach einem bestimmten Programm angesteuert werden. Während der induktionsarme Wechselrichter-Kurzschliesser (8) die Wechselrichter vom Entladestrom des Zwischenkreis-Kondensators entlastet, absorbiert der Gleichrichter-Kurzschliesser (6) einen Teil des Generator-Kurzschlussstromes. Er ist vom letzten durch die Schutzdrosselspule (5) entkoppelt.

Zur Erhöhung der Verfügbarkeit wurden die Zwischenkreis-Gleichrichter und die Wechselrichter auch dispositionsmässig zweiteilig ausgeführt. Die Lokomotive kann deshalb mit nur einem einzigen arbeitenden Drehgestell verkehren, wenn beispielsweise eine Baugruppe ausfällt.

Im folgenden werden die wichtigsten Bauteile der Leistungs- und Hilfsbetriebestromkreise näher erläutert. Die technischen Daten sind in der Tabelle 3 zusammengestellt.

Hauptgenerator, Gleichstromzwischenkreis

Hauptgenerator

Der Hauptgenerator ist eine dreiphasige Synchronmaschine mit schleifringloser Erregung. Die elektrische Auslegung wurde vor allem durch die Forderung beeinflusst, dass die Fahrmotoren in der Lage sein müssen, das volle Drehmoment auch bei der kleinsten Dieselmotor-Betriebsdrehzahl abzugeben. Bei der verwendeten Wechselrichterschaltung ist dies nur möglich, wenn im Zwischenkreis die volle Spannung anliegt. Aus diesem Grund muss der Hauptgenerator bereits bei der niedrigsten Betriebsdrehzahl die maximale Spannung erzeugen. In Anbetracht des Wechselrichter-Schutzkonzeptes mit schnellschaltenden Kurzschliessern war zudem eine absolut kurzschlussfeste Maschinenkonstruktion erforderlich.

Als schleifringlose Erregermaschine dient ein ebenfalls dreiphasiger Hilfs-Synchrongenerator, dessen Erregerpole im Ständer montiert sind und dessen Anker über sechs mitrotierende Silizium-Scheibendioden mit den Hauptpolwicklungen verbunden ist.

Bild 17 zeigt eine Ansicht des Rotors der einlagerigen, eigenventilierten Maschine. Er ist mit der Kurbelwelle des Dieselmotors über eine drehelastische Kupplung verbunden, welche die bei Kurzschlüssen auftretenden Drehmomentstösse aufzunehmen vermag. Mit einer engen Verschachtelung der Erregermaschine, des Erregergleichrichters und des Polrades konnte eine extrem kurze Baulänge verwirklicht werden. Das Stator-Eisenpaket ist mit kräftigen, vor Verdrehung sichernden Keilen derart im Gehäuse befestigt, dass einzelne Bleche nötigenfalls ausgetauscht werden können. Für die Kontrolle der Dioden von aussen sind reichlich dimensionierte Öffnungen vorhanden. Der Kühllufteintritt erfolgt stirn-, der Austritt radial motorseitig. Wie den Schnittzeichnungen im Bild 3 entnommen werden kann, trennt eine Querwand im Vorbau diese Zonen voneinander. Die seitlichen Ansaugeöffnungen an der Vorbauhaube sind mit Düsengittern und nachgeschalteten Filtereinsätzen versehen.

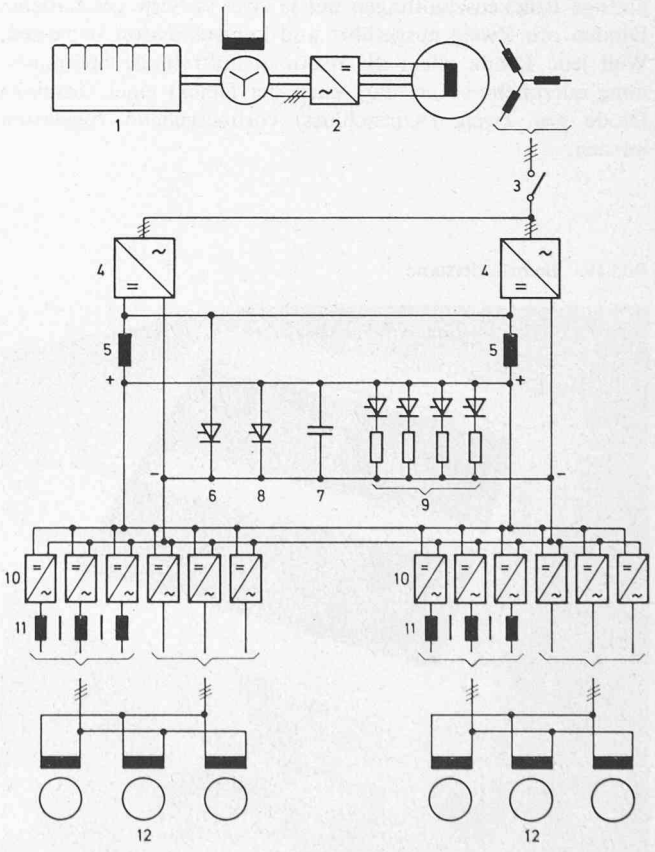


Bild 16. Hauptstromkreis-Prinzipschaltbild

[1]) Der erste Teil des Aufsatzes ist in H. 14, S. 193–202, erschienen.

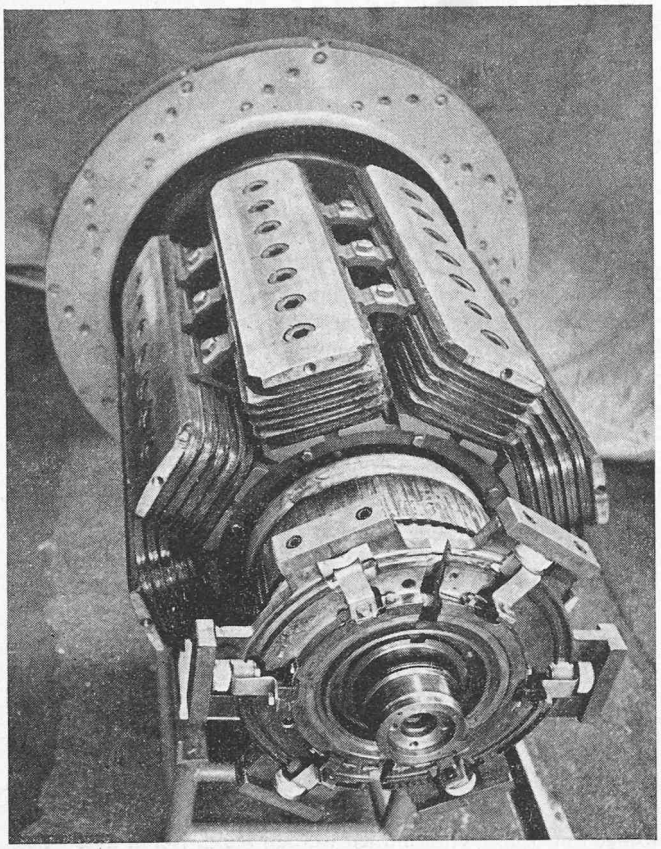


Bild 17. Rotor des Hauptgenerators

Zwischenkreis-Gleichrichter

Die beiden Zwischenkreis-Gleichrichter sind als dreiphasige Brückenschaltungen mit je zwei in Serie geschalteten Dioden pro Zweig ausgeführt und kurzschlussfest bemessen. Weil jede Diode allein die maximal auftretende Sperrspannung aufzunehmen vermag, kann der Defekt einer einzelnen Diode pro Zweig (Kurzschluss) vorübergehend zugelassen werden.

Bild 18. Bremswiderstand

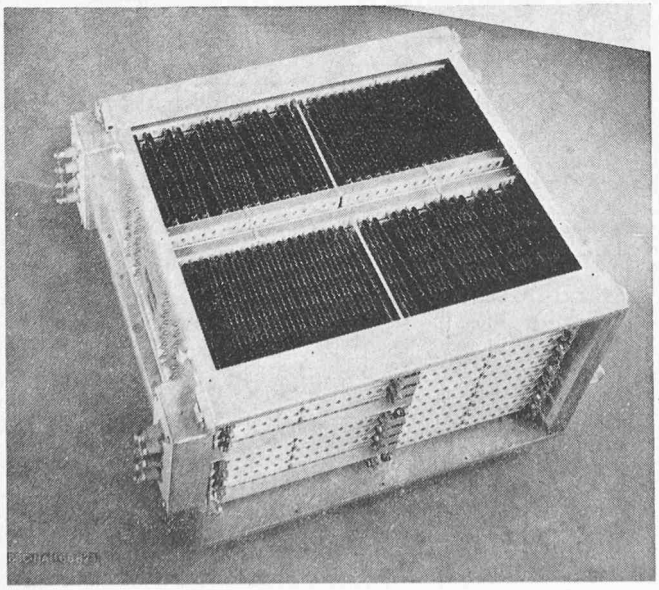


Tabelle 3. Daten der wichtigsten elektrischen Apparate

Hauptgenerator	
Polzahl	8
Drehzahl	750–1500 U/min
Frequenz	50–100 Hz
Nennleistung	1725 kVA
Spannung	1221 V
Strom maximal	816 A
Zwischenkreis-Gleichrichter (kurzschlussfest)	
Sperrspannung	2300 V
Stützkondensator	
Kapazität	23 mF
Spannung	1600 V
Bremswiderstand	
Leistung	4×360 kW = 1440 kW
Ohmwert	$4 \times 1{,}57\ \Omega = 6{,}26\ \Omega$
Benötigte Luftmenge	7,5 m³/s
Wechselrichter	
Eingangsspannung	1500 V (Fahren) 800–1500 V (Bremsen)
Grundschwingungsfrequenz	0–100 Hz
Taktfrequenz	16–190 Hz
Ausgangsspannung	0–1350 V
Ausgangsstrom (maximaler Effektivwert der Grundschwingung)	400 A
Gleichphasige Glättungsdrosselspule	
Strom maximal	400 A
Spannungs-/Zeitfläche	8 Vs
Fahrmotor	
Polzahl	4
Drehzahl	0–3000 U/min
Dauerleistung an der Welle	250 kW
Spannung	0–1350 V
Strom maximal	123 A
Maximales Drehmoment an der Welle	5300 Nm (547 mkp)
bei Drehzahl	0–467 U/min
Statorfrequenz	0–100 Hz
Schlupffrequenz bei maximalem Drehmoment	0,71 Hz
Hilfsbetriebegenerator	
Polzahl	4
Drehzahl	1500 U/min (1150 U/min bei Dieselleerlauf)
Leistung	90 kVA
Spannung	400 V
Strom maximal	130 A
Frequenz	50 Hz
Ventilator für Fahrmotor	
Drehzahl	2900 U/min
Fördermenge	1,2 m³/s
Förderhöhe	200 mm WS
Ventilator für Bremswiderstand und Ölkühler	
Drehzahl	2900 U/min
Fördermenge	7,5 m³/s
Förderhöhe	150 mm WS
Batterieladegenerator	
Drehzahl	3900 U/min
Leistung	10 kW
Batterie	Typ Leclanché 3 Y 20
Spannung	6×6 V + 14×6 V
Kapazität	240 Ah

Stützkondensator

Der Stützkondensator besteht aus 18 Metallpapierkondensatoren, die je mit einer Abreiss-Sicherung versehen sind. Diese Kondensator-Batterie ist zwischen beiden Wechselrichtern aufgestellt, was kurze Verbindungsleitungen mit kleiner Induktivität ergibt.

Bremswiderstand

Der in Bild 18 dargestellte *forciert belüftete Hochleistungswiderstand* ist eine Neuentwicklung. Die beträchtliche Leistungssteigerung im Vergleich zu älteren Ausführungen konnte mit einer besonderen kiemenförmigen Gestaltung der Widerstandsbänder erzielt werden, die bewirkt, dass die Luftdurchströmung mit starker Turbulenz erfolgt.

Wechselrichter, Fahrmotoren

Wechselrichter mit gleichphasiger Drossel

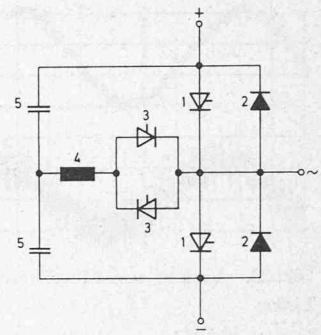
Nach Bild 16 ist jede Fahrmotorwicklung mit zwei Phasenbausteinen des zugehörigen Wechselrichters verbunden, wobei in diese Stromkreise eine dreiphasige Drosselspule mit magnetisch eng gekoppelten Wicklungen eingeschlauft ist. Diese Spaltung mit zwei elektronischen Umschaltern pro Motorphase wird als zweipulsig bezeichnet. Sie ergibt bei niedriger Wechselrichter-Taktfrequenz einen kleinen Oberschwingungsgehalt im Fahrmotorstrom [9]. Den Prinzip-Aufbau eines Wechselrichterbausteins, der auch konstruktiv eine kompakte Baueinheit darstellt, zeigt Bild 19. Gemäss Bild 20 sind je sechs derartige Baugruppen unter Öl in einem Leichtmetallkessel angeordnet.

Die gleichphasigen Drosselspulen weisen je drei auf einem gemeinsamen Eisengestell mit enger magnetischer Kopplung angeordnete Wicklungen auf. Sie bewirken, dass trotz dem fehlenden Sternpunkt in den Asynchron-Fahrmotoren die Summe der drei Wicklungsströme stets Null ist oder, mit anderen Worten, dass keine gleichphasigen Oberschwingungen (Harmonische 3., 9., 15., 21. ... Ordnung) im Motorstrom auftreten. Die Drosselspulen sind gemeinsam mit den Zwischenkreis-Gleichrichtern, den Schutzdrosselspulen und den Schaltthyristoren für die Bremswiderstände in je einem Ölkessel pro Drehgestell untergebracht.

Wechselrichter-Steuerverfahren

Die Wechselrichter werden im Anfahrbereich im Unterschwingungsverfahren und bei höherer Geschwindigkeit bzw. Frequenz mit versetzter Grundfrequenz-Taktung betrieben.

Bild 19. Prinzip-Schaltbild des Wechselrichterbausteins
1 Hauptthyristoren
2 Hauptdioden
3 Löschthyristoren
4 Löschdrosselspule
5 Löschkondensatoren



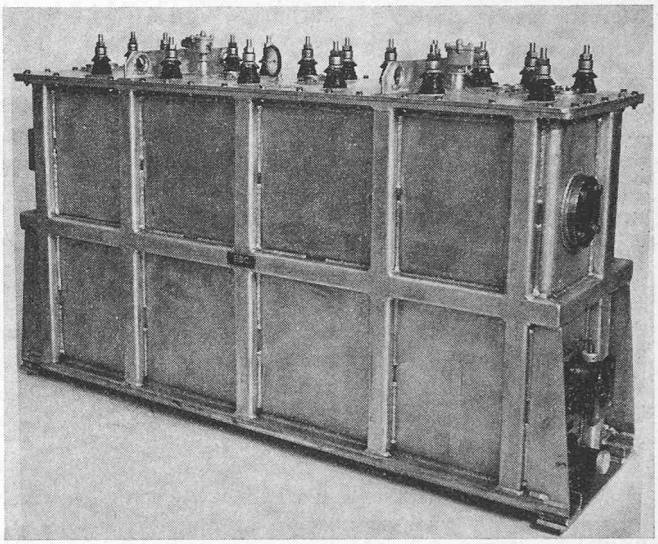
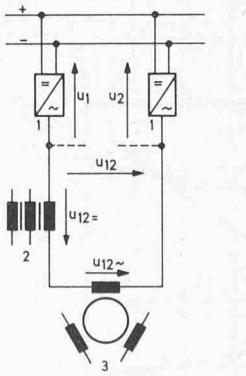


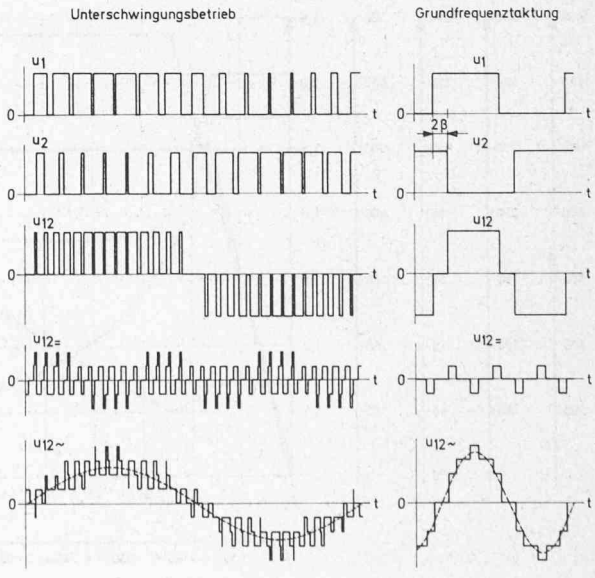
Bild 20. Wechselrichter

Bild 21 zeigt den Verlauf der verschiedenen Spannungen im Stromkreis einer Motorphase. Im Unterschwingungsbetrieb schalten die Wechselrichterbausteine während jeder Halbwelle mehrmals um. Die Schaltfolge ist dabei so abgestimmt, dass der Mittelwert der Wicklungsspannung sinusförmig verläuft. Der Motorstrom kann infolge der Wicklungs-Streuinduktivität diesen Spannungssprüngen nur verzögert folgen. Er steigt bei positiven Spannungswerten an und fällt bei negativen Werten ab; im Mittel verläuft er ebenfalls sinusförmig. Mit diesem Steuerverfahren können Amplitude und Frequenz

Bild 21. Spannungsverlauf am Wechselrichter und am Fahrmotor beim Unterschwingungsbetrieb und bei grundfrequenter Taktung



1 Wechselrichter-Phasenbausteine
2 Gleichphasige Drosselspule
3 Fahrmotor



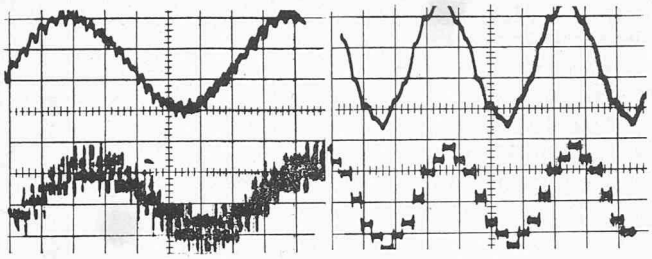


Bild 22. Verlauf von Motorstrom und -spannung (Oszillogramm)
Links:
f_{Stat} = 14,6 Hz
$I_{Wechselrichter}$ = 350 A
(Unterschwingungsbetrieb)
Rechts:
f_{Stat} = 50,7 Hz
$I_{Wechselrichter}$ = 235 A
(Grundfrequenztaktung)

der grundfrequenten Motorspannung unabhängig voneinander eingestellt werden. Die Umschaltung zur Grundfrequenztaktung erfolgt bei ca. 16 Hz. Auch in diesem Betrieb lässt sich der Mittelwert der Spannung durch die Versetzung zwischen den rechteckförmigen Ausgangsspannungen der beiden Wechselrichterbausteine beeinflussen. Der Versetzungswinkel beträgt bei voller Spannungsaussteuerung $\beta = 15°$ (auf eine weitere Verkleinerung von β wird mit Rücksicht auf den Oberschwingungsgehalt des Motorstroms verzichtet). Im Bild 22 sind zwei Oszillogramme vom Strom- und Spannungsverlauf bei Unterschwingungsbetrieb und bei Grundfrequenztaktung einander gegenübergestellt.

Asynchron-Fahrmotoren

Die Fahrmotoren sind in der elektrischen Auslegung sorgfältig auf die Wechselrichter abgestimmt worden. Bei der Optimierung dieses Antriebssystems mussten verschiedene Faktoren, wie Streuinduktivität, Widerstand der Rotorwicklung, Einsatzpunkt für die Feldschwächung usw., berücksichtigt werden. Bild 23 zeigt den Verlauf der wichtigsten elektrischen Grössen beim Betrieb mit grösstmöglichem Drehmoment. Es sind folgende *Frequenz- bzw. Geschwindigkeitsbereiche* zu unterscheiden:

- Im Bereich von 0–15,6 Hz (0–13,5 km/h) wird die Spannung annähernd linear erhöht, was zur Folge hat, dass der Fahrmotor mit praktisch konstantem Fluss arbeitet. Weil der Strom konstant gehalten wird, steigt die Leistung ebenfalls linear an.
- Ab 15,6 Hz (13,5 km/h) nimmt der Fahrmotor die maximal verfügbare Leistung des Dieselmotors auf. Bis zum Erreichen der maximalen Spannung bei 24 Hz (21,5 km/h) werden deshalb der Strom und die Schlupffrequenz annähernd linear verkleinert.
- Im Bereich über 24 Hz (21,5 km/h) wird bei konstanter maximaler Spannung nur noch die Frequenz erhöht; der Fluss sinkt in der Maschine ab, die nun im sogenannten «Feldschwächebereich» arbeitet. Damit der Strom in erster Näherung konstant verläuft, wird die Schlupffrequenz annähernd linear angehoben.

Der konstruktive Aufbau der Maschine geht aus der Schnittzeichnung in Bild 24 hervor. Das vollständig geschweisste Statorgehäuse trägt auf der Oberseite den Belüftungsstutzen sowie den Klemmenkasten. Dieser umfasst neben den eigentlichen Wicklungsanschlüssen je einen Stecker für die am Radkasten angebauten Drehzahl-Impulsgeber und für die im Stator-Eisenpaket montierten Temperatursonden. Die Befestigung der Stator-Eisenbleche wurde in der bei Fahrmotoren üblichen Art ausgeführt, die einen späteren Ein- und Ausbau gestattet. Die Statorwicklung ist mit Materialien der Klasse H isoliert und mit einem lösungsmittelfreien Silikonharz der gleichen Temperaturklasse unter Vakuum und Überdruck imprägniert. Besondere Aufmerksamkeit wurde einer guten Abstützung der Wicklungsköpfe geschenkt. Der Rotor ist beidseitig mit Zylinderrollenlagern gelagert, die unter voller Berücksichtigung der hohen Dauerzugkräfte derart ausgelegt wurden, dass sie beim vorgesehenen Betriebseinsatz der Lokomotiven eine Lebensdauer erreichen, die den für Streckenlokomotiven üblichen Werten entspricht. Das Ritzel musste infolge der hohen Getriebeübersetzung mittels eines zapfenförmigen Schaftes in die Welle eingesetzt werden. Die Rundstäbe und die stirnseitigen Ringe der nichtisolierten Käfigwicklung bestehen aus einer Spezialkupferlegierung. Für die Kühlung derselben weist der Rotor am ganzen Umfang verteilte axiale Bohrungen auf.

Hilfsbetriebe

Wechselstrom-Hilfsbetriebe

Für den Antrieb der sechs Fahrmotor-Ventilatoren, des Bremswiderstand-Ventilators und der beiden Stromrichter-Ölpumpen dienen normale Industrie-Asynchronmotoren mit Kurzschlussläudern. Die erforderliche dreiphasige Wechsel-

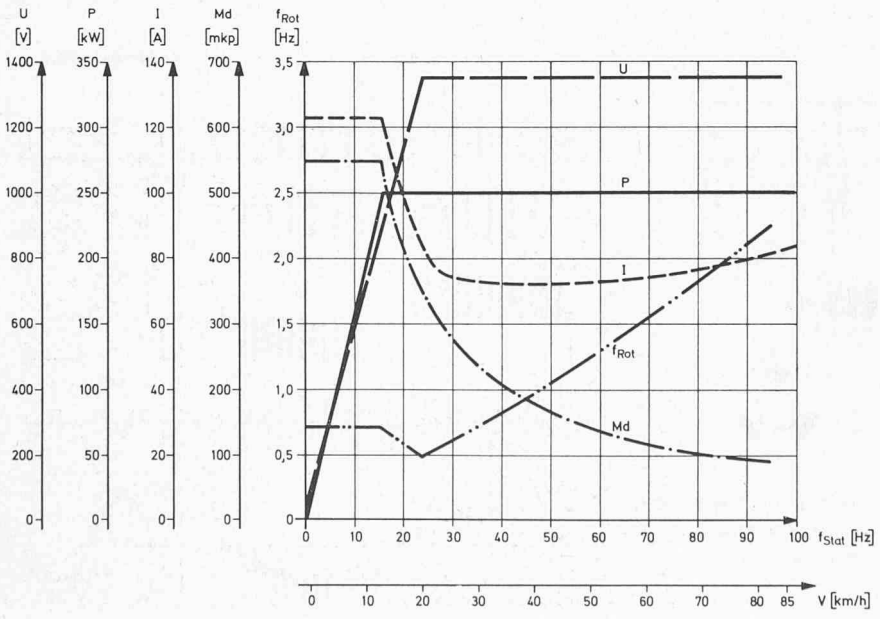


Bild 23. Kennlinien des Fahrmotors bei Betrieb mit maximalem Drehmoment
P Leistung an der Motorwelle
U Netzspannung/Phase
I Strom
Md Drehmoment an der Motorwelle
f_{Rot} Schlupffrequenz am Rotor
f_{Stat} Statorfrequenz
V Geschwindigkeit

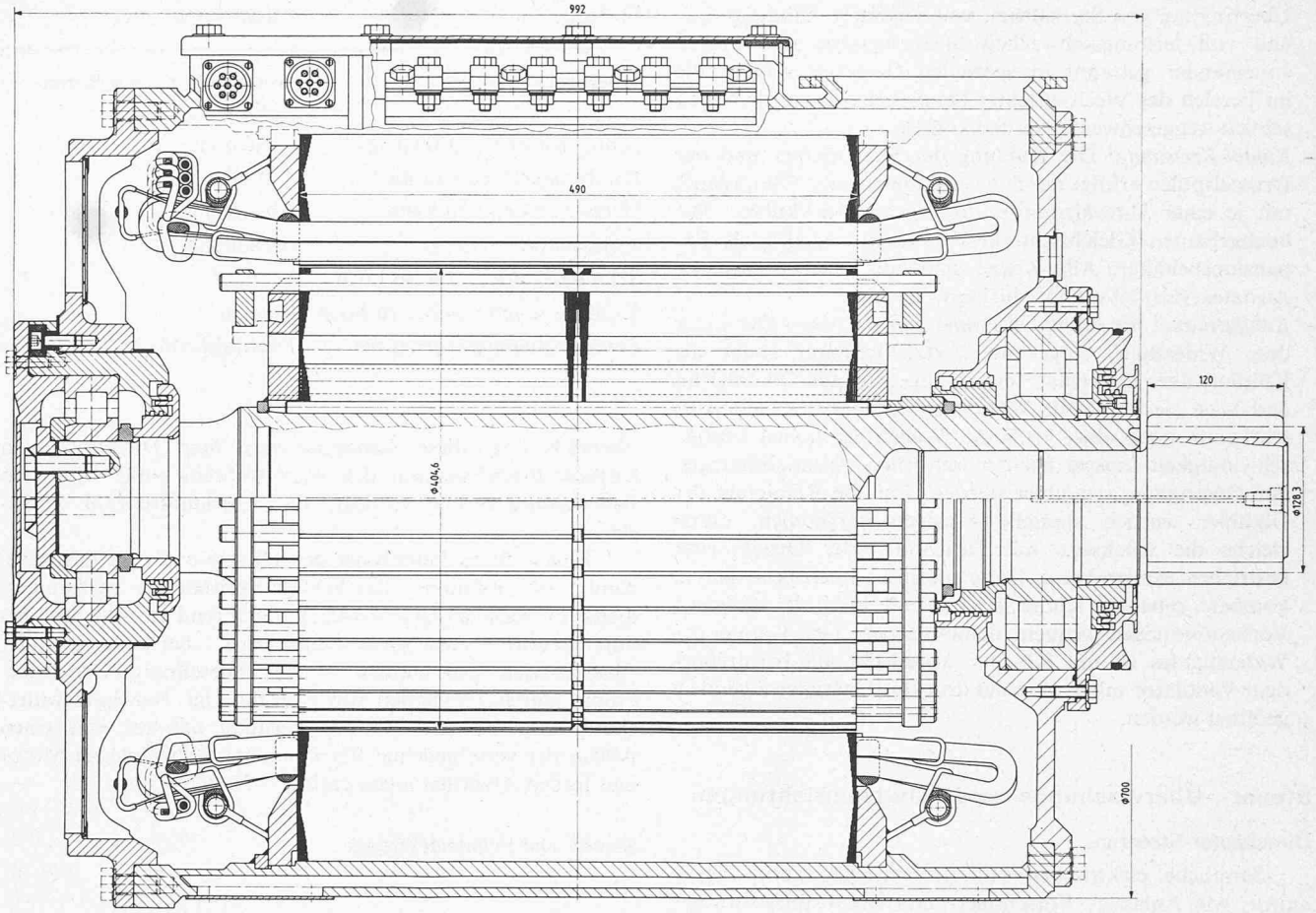


Bild 24. Schnitt durch den Fahrmotor

spannung erzeugt der Hilfsbetriebe-Synchrongenerator, der seinerseits durch die Hydrostatik mit konstanter Drehzahl angetrieben wird. Die Fahrmotor-Ventilatoren und die Ölpumpen sind ohne Schalter mit dem Hilfsbetriebenetz verbunden und drehen somit bei laufendem Dieselmotor ständig. Die Absicherung erfolgt mit platzsparenden Schaltautomaten vom Typ Picomat der Firma CMC (Schaffhausen).

Gleichstrom-Hilfsbetriebe

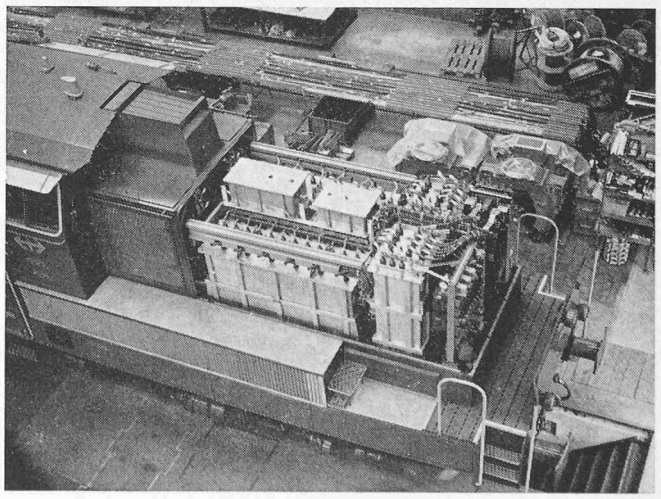
Die Lokomotive ist mit einer 120-V-Bleibatterie in normalisierter SBB-Ausführung ausgerüstet, die einen zusätzlichen Abgriff an 36 V aufweist. Die Batterieladung erfolgt – auf ähnliche Weise wie bei Reisezugwagen – durch einen direkt vom Dieselmotor angetriebenen Klauenpol-Synchrongenerator. Der 120-V-Teil speist u.a. die Anlasser, die Vorschmier- und Brennstoff-Vorförderpumpen zum Dieselmotor, den Generatorstromregler, die Beleuchtung und die Fensterheizung. Am 36-V-Teil sind sämtliche Steuer-, Kontroll- und Schutzeinrichtungen sowie das Sprechfunk- und das Funkfernsteuergerät angeschlossen. Für die Absicherung der verschiedenen Apparategruppen dienen ebenfalls Kleinschaltautomaten der Bauart «Picomat» in einer Gleichstrom-Sonderausführung.

Apparatedisposition im Vorbau I

Einen Einblick in die Apparatedisposition im Vorbau I gibt Bild 25. Wie beim Vorbau II musste auch hier der zur Verfügung stehende Einbauraum maximal ausgenützt werden, was u.a. eine sorgfältige Abstimmung der äusseren Bauteilabmessungen auf den Einbauort voraussetzte. Für die Plazierung der verschiedenen Apparate waren folgende Gesichtspunkte massgebend:

- *Leichte Demontierbarkeit:* Alle Baugruppen sind so angeordnet, dass sie – bei abgehobener Vorbauhaube – nach oben aus- und eingebaut werden können. Für den Austausch der beiden Kurzschliesser wurde die Vorbauhaube mit speziellen Klappen versehen.
- *Elektrische Verkabelung:* Es wurden möglichst kurze Verbindungen zwischen allen am Gleichspannungs-Zwischenkreis angeschlossenen Apparaten angestrebt. Sämtliche Hilfsapparate des Hauptstromkreises, wie Trennhüpfer, Strom- und Spannungswandler usw., sind in Blockbauweise auf einem Apparategerüst zusammengefasst. Die Kabel für die

Bild 25. Ansicht des Vorbaus I bei abgehobener Haube



Übertragung von Starkstrom, von Thyristor-Zündimpulsen und von leistungsschwachen Steuersignalen sind örtlich voneinander getrennt in speziellen Gerüsten verlegt, die im Bereich der Wechselrichter bei einem Ausbau derselben seitlich weggeschwenkt werden können.

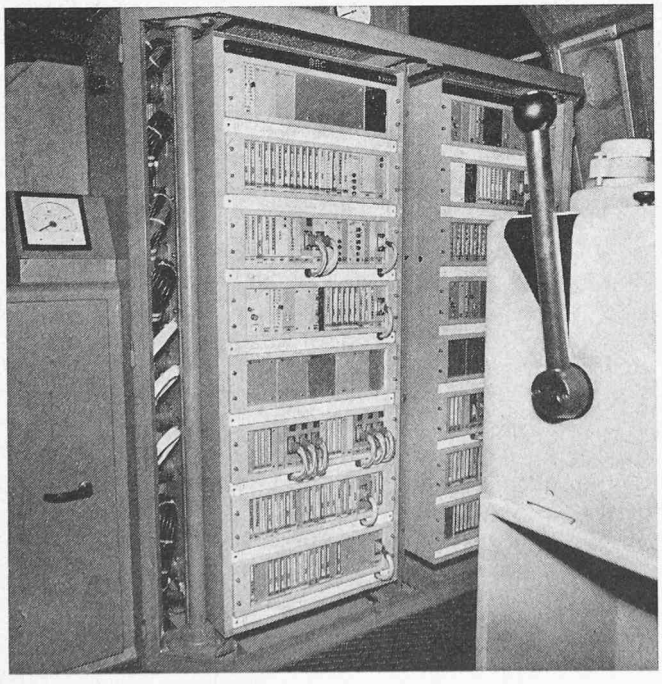
- *Kühlöl-Kreisläufe:* Die Kühlung der Stromrichter und der Drosselspulen erfolgt durch zwei symmetrische Ölkreisläufe mit je einer Umwälzpumpe und einem Rückkühler. Die hochgebauten Gleichrichterkessel dienen zugleich als Expansionsbehälter. Alle Kessel sind zur Erleichterung der Austauschbarkeit mit Ölschiebern versehen.
- *Kühlluftkanal für Bremswiderstand und Ölkühler:* Der unter dem Widerstand eingebaute Axial-Ventilator saugt die Kühlluft über die beiden seitlich angeordneten Ölkühler an und bläst sie durch die Widerstandsbänder und den Austrittkamin nach oben ins Freie. Wegen der hohen Luftgeschwindigkeit musste bei den seitlichen Ansaugöffnungen auf Düsengitter verzichtet werden. Für die Reinigung der Ölkühler wurden spezielle Klappen vorgesehen, durch welche die Rückseite mit Druckluft oder Druckwasser bestrichen werden kann. Diese spezifisch hoch belastbaren, kompakt gebauten Kühler sind zudem durch die seitlichen Vorbauöffnungen bequem demontierbar. Der Kamin des Widerstandes ist mit Klappen abgedeckt, die bei drehendem Ventilator mit Hilfe eines druckluftbetätigten Zylinders geöffnet werden.

Steuer-, Überwachungs- und Schutzeinrichtungen

Dieselmotor-Steuerung

Sämtliche elektrischen Hilfseinrichtungen zum Dieselmotor, wie Anlasser, Vorschmier- und Brennstoffvorförderpumpen, elektropneumatische Ventile für Starthilfe und Notabstellung usw., werden von einer konventionellen, d.h. in Relaistechnik aufgebauten Steuerung betätigt. Diese steuert den Anlassvorgang automatisch nach einem bestimmten Programm, das u.a. eine Vorschmier- und Brennstoffvorförderdauer von 30 s vorsieht. Beim Ansprechen der verschiedenen Überwachungseinrichtungen übt die Dieselmotorsteuerung zudem folgende Funktionen aus:

Bild 26. Elektronikblock



Störung	Auswirkung
Überdrehzahl	Notabstellung mit Brennstoffausblasung
Schmieröldruck zu niedrig	Abstellung
Kühlwasserniveau zu niedrig	Abstellung
Druckluftvorrat zu klein	Abstellung
Anlassdauer zu gross	Abstellung
Schmieröltemperatur zu hoch	Leerlauf
Kühlwassertemperatur zu hoch	Leerlauf
Schmieröltemperatur zu tief	Drehzahlstufe 2

Ebenfalls über diese Steuerung wird dem Dieselmotor in längeren Betriebspausen, d.h. wenn während einiger Zeit kein Fahrrichtungsbefehl vorliegt, die Leerlaufdrehzahl vorgegeben.

Eine weitere Betriebsart des Dieselmotors ist das sogenannte «Warmfahren», das bei der Verwendung im Rangierdienst in regelmässigen Abständen während einigen Stunden durchgeführt werden muss. Dabei wird – bei laufender oder stillstehender Lokomotive – die Dieselmotor-Generatorgruppe durch Zuschalten von zwei der vier Teil-Bremswiderstände dauernd mit erhöhter Leistung belastet, was einen Abbau der verschiedenen Verbrennungsrückstände im Motor und in den Abgasleitungen ergibt.

Steuer- und Schutzelektronik

Allgemeines

Die Halbleiter-Elektronik nimmt nicht nur im Leistungsteil, sondern auch in der Steuerung der Lokomotive einen wichtigen Platz ein. Bild 26 zeigt den umfangreichen Elektronikblock. Er umfasst nach Bild 27 die Funktionsgruppen Dieselmotor- und Generatorregelung, Wechselrichter- bzw. Drehgestellregelung und übergeordnete Lokomotivsteuerung (der Einfachheit halber ist in diesem Prinzipschema nur eine der beiden Wechselrichterregelungen dargestellt). Eng verknüpft mit diesen Geräten sind zudem die im Bild 29 aufgeführten Schutzeinrichtungen.

Dieselmotorregelung

Wie bereits erwähnt, sorgt die Dieselmotorregelung dafür, dass der Motor gemäss den Kennlinien von Bild 12 im ganzen Leistungsbereich mit optimaler Drehzahl bzw. Füllung arbeitet. Zu diesem Zweck werden am Dieselmotor die Ist-Werte von Füllung und Drehzahl mit den elektronischen Gebern (1, 2) erfasst. In den Funktionsbildern (7, 8) ist die optimale Füllung-Drehzahl-Kennlinie programmiert. Über den Dreipunktregler (5), den Stufenzähler (6) und den Woodward-Regler (3) wird die Drehzahl des Dieselmotors so lange verstellt, bis die Abweichung ΔF zwischen Soll- und Ist-Füllung innerhalb des zulässigen Toleranzbereiches liegt. Mit dem Funktionsbildner (8) und dem Differenzbildner (9) wird ermittelt, um wie viel die momentane Füllung vom optimalen Wert F_{opt} bei der momentanen Drehzahl abweicht. Bei zu grossen Abweichungen sorgt der Regler (10) für eine Leistungsbegrenzung über die Schlupf-Sollwertvorgabe (Multiplikator 40) und in einigen Fällen für eine Spannungsreduktion im Gleichspannungs-Zwischenkreis (Kleinstwertbildner 15).

Generatorregelung

Der auf den Erregergenerator einwirkende Generatorregler regelt im Fahrbetrieb die mit dem Wandler (11) gemessene Zwischenkreisspannung auf den konstanten Wert von 1500 V. Hierzu dient der Soll-Wert-Geber (14), der Diffe-

renzbildner (16) und der Integrator (17). Im Bremsbetrieb wird die Generator-Ausgangsspannung über den Wandler (12) sowie den Gleichrichter (13) erfasst und auf einen Wert geregelt, der einer Zwischenkreisspannung von 800 V entspricht. Beim Eingriff der Leistungsbegrenzung bewirkt der Kleinstwertbildner (15) eine Verkleinerung des Spannungs-Sollwertes.

Wechselrichterregelung

Die Wechselrichterregelung gewährleistet, dass die Fahrmotoren bei jedem vorgegebenen Schlupf mit der in Frequenz und Amplitude richtigen Statorspannung betrieben werden [10]. Sie bildet als Ausgangssignale die Impulse für die Zündung der Haupt- und Hilfsthyristoren in den zugehörigen Wechselrichtern. Als Eingangssignale treten neben dem Schlupf-Sollwert der mit dem Wandler (18) gemessene Motorstrom und die mit den Impulsgebern (19) erfasste Motorfrequenz auf.

Eine statorfrequente Wechselspannung f_{Stat} wird mit dem u/f-Wandler (20) und dem digitalen Frequenz-Addierer (21) durch Addieren einer schlupffrequenten Impulsreihe f_{Rot} zur drehzahlproportionalen Impulsreihe f_{Mot} gebildet, wobei der u/f-Wandler den Einfluss der Rotortemperatur auf das Motor-Drehmoment automatisch kompensiert. Eine zur Amplitude der Statorspannung proportionale Gleichspannung $\hat{u}_{Stat}$ wird im wesentlichen durch den f/u-Wandler (22) geprägt, welcher für einen drehzahlproportionalen Anstieg sorgt. Bei niedriger Drehzahl ist zudem der von den Elementen (23–26) gebildete Stromregelkreis wirksam, der bewirkt, dass die Motoren bei jeder Belastung optimal, d.h. mit kleinstem Strom, arbeiten. Die zur gewünschten Statorspannung proportionale Steuerspannung u_{St} entsteht durch das Multiplizieren der beiden Signale f_{Stat} und $\hat{u}_{stat}$ (Multiplikator 27).

Die Zündimpulsbildung erfolgt im Steuersatz (29). Hierfür wird die Steuerspannung u_{St} nach Bild 28 mit einer Hilfsspannung u_{HSt} verglichen, die im Unterschwingungsbetrieb sägezahnförmig mit konstanter Frequenz verläuft. Bei jedem Schnittpunkt dieser beiden Signale wird über die Endstufen (29) eine Thyristorzündung und somit eine Stromwendung im zugehörigen Wechselrichter-Baustein ausgelöst. Im Betrieb mit Grundfrequenztaktung verläuft die Hilfsspannung sinusförmig mit einer Phasenverschiebung von 90° zur Steuerspannung u_{St} (vgl. Bild 28, rechts).

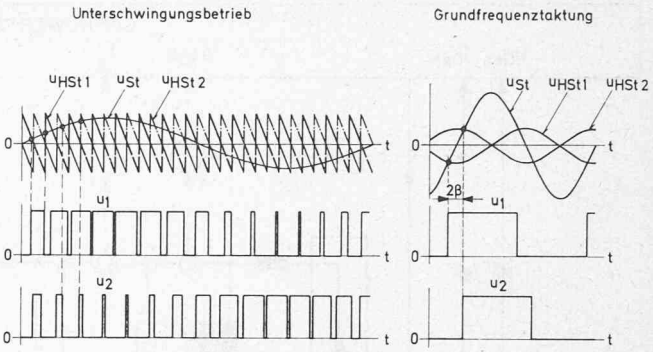


Bild 28. Prinzip der Steuerwinkelbildung

u_{St} Steuerspannung
u_{HSt1} Hilfssteuerspannung (Wechselrichterbaustein 1)
u_{HSt2} Hilfssteuerspannung (Wechselrichterbaustein 2)
u_1 Ausgangsspannung von Wechselrichterbaustein 1
u_2 Ausgangsspannung von Wechselrichterbaustein 2 (vgl. Bild 21)

Lokomotivsteuerung

In dieser Funktionsgruppe sind folgende übergeordnete *Regel- und Steuerstromkreise* zusammengefasst:

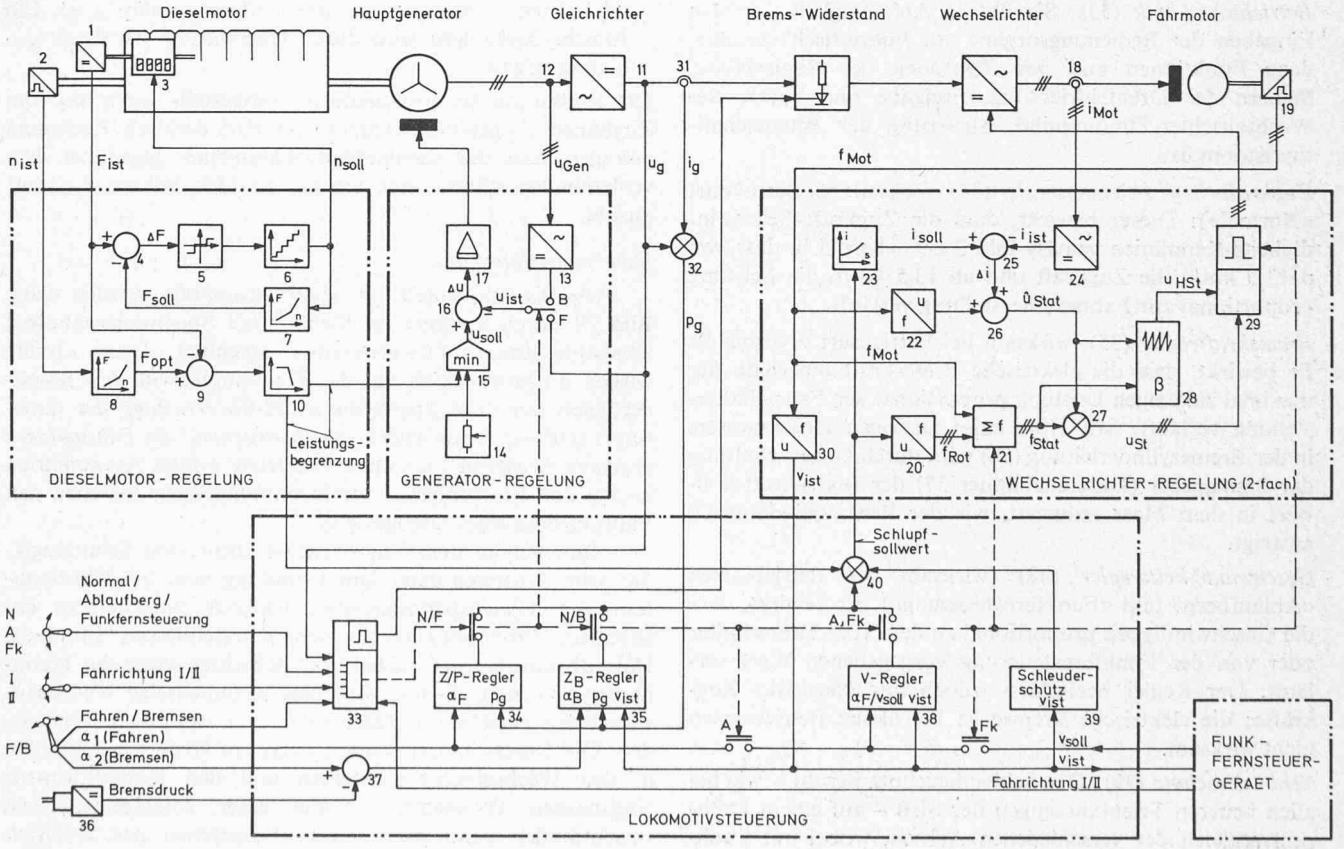


Bild 27. Vereinfachtes Blockschaltbild der Steuerelektronik

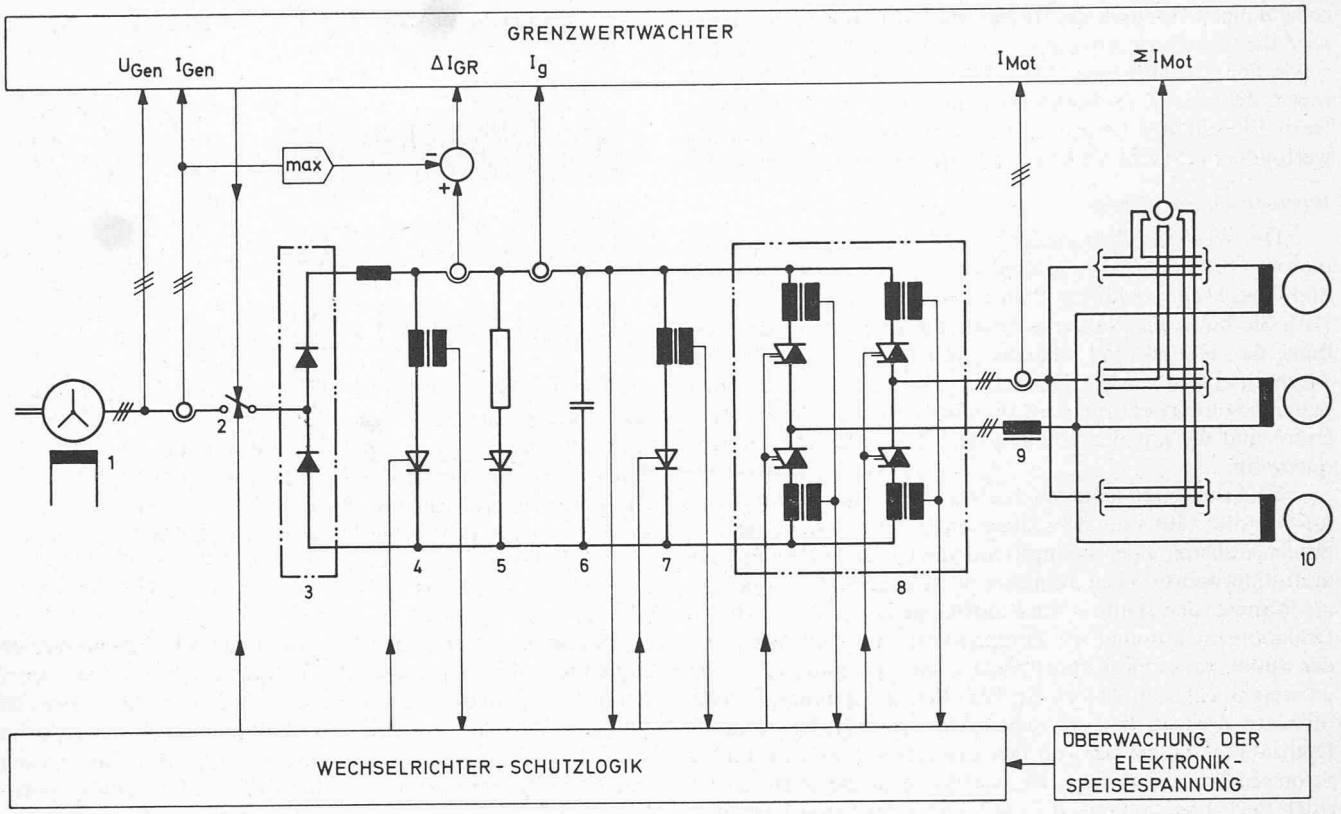


Bild 29. Vereinfachtes Blockschaltbild der Schutzelektronik

1 Hauptgenerator
2 Trennhüpfer
3 Zwischenkreis-Gleichrichter
4 Gleichrichter-Kurzschliesser
5 Bremswiderstand mit Schaltthyristor
6 Stützkondensator
7 Wechselrichter-Kurzschliesser
8 Wechselrichter
9 Gleichphasige Drosselspule
10 Fahrmotor

- *Betriebsart-Logik* (33): Sie übt in Abhängigkeit von den Eingaben der Bedienungsorgane am Führertisch verschiedene Funktionen aus, wie Zuordnen der Reglerkreise, Steuern der Drehfeldrichtung, Freigabe und Sperre der Wechselrichter-Zündimpulse, Steuerung der Bremsschaltthyristoren usw.
- *Zugkraft- bzw. Leistungsregler* (34) (wirksam bei Betriebsart «Normal»): Dieser bewirkt, dass die Zugkraft-Geschwindigkeits-Kennlinien gemäss Bild 2 entstehen, d.h. dass von 0–13,5 km/h die Zugkraft und ab 13,5 km/h die Leistung proportional zur Fahrschalterstellung verläuft.
- *Bremskraftregler* (35) (wirksam bei Betriebsart «Normal»): Er bewirkt, dass die elektrische Bremskraft innerhalb der maximal zulässigen Leistung proportional zur Fahrschalterstellung verläuft. Mit Hilfe eines analogen Druckmessers in der Bremszylinderleitung (36) wird durch Gegenschaltung der Signalgeber (Differenzbildner 37) der Bremskraft-Sollwert in dem Mass reduziert, wie der Bremszylinderdruck ansteigt.
- *Geschwindigkeitsregler* (38) (wirksam bei Betriebsarten «Ablaufberg» und «Funkfernsteuerung»): Er bewirkt, dass die Geschwindigkeit proportional zu dem vom Fahrschalter oder von der Funkfernsteuerung vorgegebenen Wert verläuft. Der Regler beeinflusst jedoch nur «positive» Zugkräfte; die elektrische Bremse ist bei diesen Betriebsarten nicht wirksam.
- *Schleuderschutz* (39): Der Schleuderschutz beruht – wie bei allen neueren Triebfahrzeugen der SBB – auf einem Drehzahlvergleich der verschiedenen Achsen, wobei mit wachsender Geschwindigkeit zwischen der langsamsten und der schnellsten Achse eine grössere Differenz zulässig ist. Ein Allachs-Schleudern wird durch Überwachen der Beschleunigung erfasst.

Der Entlastung des vorlaufenden Drehgestells durch das vom Zughaken ausgeübte Drehmoment wird dadurch Rechnung getragen, dass das nachlaufende Drehgestell gegenüber dem vorlaufenden ständig eine um ca. 10–15% höhere Zugkraft ausübt.

Schutzeinrichtungen

Die Komponenten im Hauptstromkreis werden nach Bild 29 durch mehrere an Strom- und Spannungswandlern angeschlossene Grenzwertwächter geschützt. Diese Geräte wirken im Störungsfall auf die Trennhüpfer ein. Als Besonderheiten seien die *Stromdifferential-Überwachung des Generators* und die *Stromsymmetrie-Überwachung der Fahrmotoren in jedem Drehgestell* erwähnt. Die letzte erfasst Asymmetrien in den drei Motorphasen *und* Stromdifferenzen zwischen den Fahrmotoren jedes Drehgestells.

Zum Schutz der Wechselrichter dient eine Schutzlogik, die beim Auftreten einer Durchzündung oder bei Überspannung im Gleichspannungs-Zwischenkreis nach einem bestimmten Programm die beiden Kurzschliesser, sämtliche Hauptthyristoren der beiden Wechselrichter sowie die Trennhüpfer ansteuert. Damit wird eine strommässige Überbeanspruchung einzelner Halbleiterelemente weitgehend vermieden. Die Durchzünderfassung erfolgt mit Hilfe von speziellen in den Wechselrichterbausteinen und den Kurzschliessern eingebauten Wandlern. Anhand einer Anzeigelogik mit Leuchtdioden kann nach jedem Ansprechen des Wechselrichterschutzes die primäre Störungsursache ermittelt werden.

Geschwindigkeitsmessung, Sicherheitseinrichtungen

Geschwindigkeitsmessung

Die Lokomotive ist mit zwei konventionellen Geschwindigkeitsmessern vom Typ RT9 (mit Streifenregistrierung) bzw. R9 (mit Farbscheibenregistrierung) der Firma Hasler (Bern) ausgerüstet, die von einem gemeinsamen Achsgeber angetrieben werden. Für den Ablaufbergbetrieb sind zudem vier Doppelanzeigeinstrumente vorhanden, die gleichzeitig die Soll- und Ist-Geschwindigkeiten im Bereich 0–20 km/h anzeigen.

Im Sinne eines Systemerprobungsversuches wurde auf einem Teil der Lokomotiven eine neue radunabhängige Geschwindigkeitsmessanlage der Firma Hasler eingebaut. Diese tastet mit zwei im Drehgestell montierten optischen Detektoren die Reflexionseigenschaften der Schienenoberfläche ab und ermittelt aus den beiden dadurch entstehenden Signalen mittels eines Korrelationsverfahrens die Fahrzeuggeschwindigkeit [11]. Das rad- und somit schlupfunabhängig gemessene Geschwindigkeitssignal der Anlage wird nicht nur für die Anzeigeinstrumente, sondern auch für die Geschwindigkeitsregelung und für den Schleuderschutz verwendet.

Automatische Zugsicherung, Sicherheitssteuerung

Zur Erfassung von Signalen in Warn- oder Haltstellung dient – wie auf allen SBB-Streckenlokomotiven – das punktförmig wirkende induktive Zugsicherungssystem der Firma Integra (Wallisellen). Ein elektronischer Zugsicherungsapparat wertet bei Streckenfahrten Warn- und Haltsignale unterschiedlich aus, so dass nur die ersten quittiert werden können und die letzten zwangsläufig zu einer Schnellbremsung führen.

Die ebenfalls auf allen Streckenfahrzeugen vorhandene sogenannte Sicherheitssteuerung mit Wachsamkeitskontrolle überwacht, ob der Lokomotivführer normal arbeitsfähig ist. Auf Diesellokomotiven wird ein modifizierter elektronischer Sicherheitsapparat der Firma ASEGA (Gisikon) mit reduzierten Ansprechungen angewendet, der in den beiden folgenden Fällen eine *Schnellbremsung* auslöst:

- wenn der Führer nach dem Überfahren eines Signals in Warnstellung nicht innert 80 m Fahrweg einen Quittungsschalter betätigt
- wenn der Führer während 720 m Fahrweg keines der wichtigsten Bedienungsorgane betätigt, wobei während der letzten 80 m ein akustisches Warnsignal ertönt.

Bild 30. Führerstand

Sprechfunk, Funkfernsteuerung

Sprechfunk

Für den Sprechfunkverkehr im Rangier- und Streckendienst dient ein Funkgerät vom Typ SE19L der Firma Autophon (Solothurn) in normalisierter SBB-Ausführung. Die zugehörigen Mikrophone wurden mit «Schwanenhalsträgern» über den beiden Arbeitsplätzen an der Führerhauskabine befestigt.

Funkfernsteuerung

Im neuen Rangierbahnhof Zürich-Limmattal werden ab einer zentralen Leitstelle gleichzeitig drei Lokomotiven über Funk ferngesteuert. Die hiefür erforderlichen Übertragungs- und Auswerteeinrichtungen sind eine Neuentwicklung der Firma Autophon. Das System ermöglicht den Austausch der folgenden Befehle bzw. Rückmeldungen:

von Leitstelle zu Lokomotive	von Lokomotive zu Leitstelle
Adresse der Lokomotive	Adresse der Lokomotive
Fernsteuerbetrieb ungestört	Fernsteuerbetrieb ungestört, Lokomotive betriebsbereit
Sollgeschwindigkeit (0–6,35 m/s, Auflösung 0,05 m/s)	Istgeschwindigkeit (0–6,35 m/s, Auflösung 0,05 m/s)
Fahrrichtung	Fahrrichtung
Bremsen schwach	Bremsdruck schwach vorhanden
Bremsen stark	Bremsdruck stark vorhanden
Nothalt	Hauptleitung entlüftet

Die Meldungen sind technisch zu 24-Bit-Telegrammen zusammengefasst, die im 50-ms-Takt (von Leitstelle zu den drei Lokomotiven) bzw. im 150-ms-Takt (von jeder Lokomotive zur Leitstelle) übermittelt werden. Die Arbeitsfrequenz für den Duplex-Funkverkehr beträgt ca. 450 MHz. Die Lokomotiv-Auswerteapparatur ist in Digitaltechnik mit CMOS-Mikroprozessoren ausgeführt. Über Eingabetasten kann bei jeder Lokomotive die Dienstnummer sowie die der Richtung «zum Ablaufberg» entsprechende Lokomotivseite vorgegeben werden.

Apparatedisposition im Führerhaus, Störungsanzeigeeinrichtungen

Apparatedisposition im Führerhaus

Bis auf wenige Ausnahmen wurden sämtliche konventionellen und elektronischen Steuerapparate im Führerhaus untergebracht, wo sie elektrischen, mechanischen und atmosphärischen Störeinflüssen weitgehend entzogen sind. Für die Fabrikation hatte diese Lösung zudem den Vorteil, dass die ganze Führerhausausrüstung in der Schweiz bei Brown Boveri, Werk Oerlikon, vormontiert werden konnte. Die zahlreichen elektrischen und pneumatischen Verbindungsleitungen zwischen dem Führerhaus und der Lokomotivbrücke wurden über mehrpolige Steckkupplungen bzw. über Luftschläuche geführt, die durch Öffnungen am Fussboden zugänglich sind.

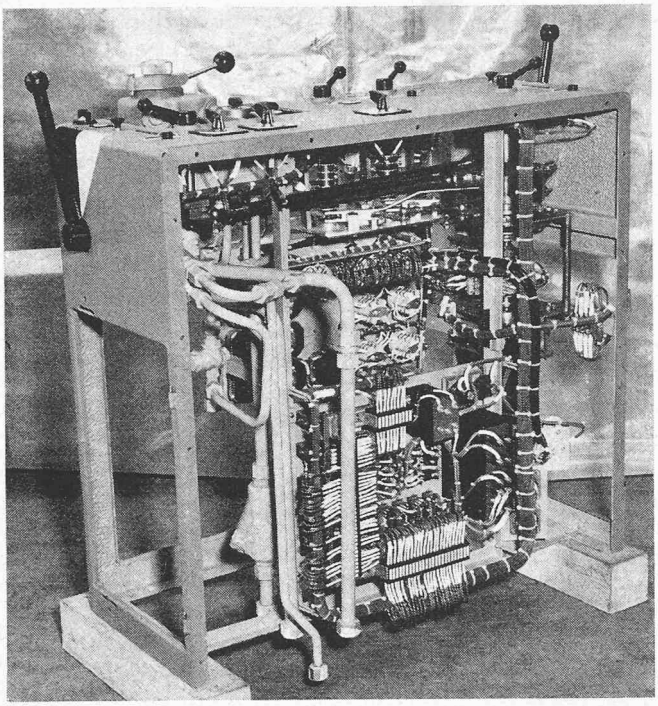


Bild 31. Rückansicht des wegnehmbaren Führertisches

Bei der Gestaltung des im Bild 30 dargestellten Führerstandes galt es, für die Triebfahrzeugbedienung möglichst ähnliche Verhältnisse zu schaffen wie auf den bisherigen Diesellokomotiven der SBB. Auf genügend Bewegungsraum für den auf einem Drehstuhl sitzenden Lokomotivführer sowie auf eine für beide Fahrrichtungen optimale Anordnung der Fahrhebel wurde speziell geachtet. Die letzten bilden zusammen mit den Fahrrichtungsschaltern, dem Anlass- und dem Betriebsartenschalter einen Bestandteil des Steuerkontrollers, der die Verriegelungsmechanismen zwischen diesen Bedienungsorganen und verschiedene Schaltwalzen, die beiden Winkeltransmitter für Fahren und Bremsen sowie das Rangierbremsventil mit den zugehörigen Antrieben umfasst. Bild 31 zeigt die Rückseite des wegnehmbaren Führertisches. Im unteren Teil befinden sich die Schalttafeln E (Erdschlussrelais für Hauptstromkreis, diverse Relais) und E_1 (diverse Abtrennschalter, Prüf- und Rückstelltasten für die automatische Zugsicherung).

Gegenüber dem Führertisch steht der Elektronikschrank, der zweimal acht in schwenkbaren Rahmen montierte Etagen der Steuer- und Schutzelektronik umfasst. Vier weitere Etagen mussten – durch Bodenklappen zugänglich – unter dem Fussboden angeordnet werden. Für die forcierte Belüftung des Elektronikschrankes wird von einem Fahrmotor-Luftkanal über ein Filter die notwendige Luftmenge abgezweigt. Die weiteren unter den vier Stirnfenstern angeordneten Apparateschränke sind nicht speziell belüftet.

Störungssignalisierung

In Anbetracht der Komplexität der Lokomotivausrüstung wurde Wert auf eine möglichst übersichtliche Störungssignalisierung gelegt. Sie ist nach dem Prinzip der Summenmeldung konzipiert, d.h. es wird am Führerstand mit je einer Meldelampe signalisiert, ob die Störung am Dieselmotor, an der Leistungsübertragung oder bei den Wechselstrom-Hilfsbetrieben aufgetreten ist. Für die detaillierte Störungssuche sind an den Apparatetafeln für die Dieselmotorsteuerung und die Hilfsbetriebespeisung sowie am Traktions-Elektronikblock die nötigen Anzeigeeinrichtungen vorhanden.

Ausblick

Nach heutiger Auffassung der SBB ist die in der Am6/6 verwirklichte Technik mit statischen Umrichtern und Drehstrom-Asynchron-Fahrmotoren ein erster markanter Schritt im Zuge einer grossen Entwicklung. Vorerst gilt es, mit dieser Technik Betriebserfahrungen auf breiter Basis zu sammeln und das Zusammenwirken aller Komponenten zu optimieren. Angesichts der Komplexität dieser Lokomotiven dürfte dafür einige Zeit notwendig sein.

Einen nächsten Schritt in sinngemässer Bauweise, jedoch mit Speisung ab Fahrdraht, stellen die schweren Rangierlokomotiven vom Typ Ee6/6^{II} dar, welche von den SBB Ende 1976 in Auftrag gegeben worden sind. Gegenüber der Umrichterlokomotive Be4/4 12001 ist das Projekt in wesentlichen Teilen weiterentwickelt, so dass das Netzverhalten günstiger und auch eine elektrische Nutzbremse möglich sein wird.

Vom Entwicklungsstand der Ee6/6^{II} aus sollte schliesslich der Schritt zur *elektrischen, schnellfahrenden Hochleistungslokomotive in Umrichtertechnik* gewagt werden können. Diese Lokomotive ist es, die endlich alle die guten Eigenschaften auf sich zu vereinigen verspricht, die sich schon Generationen von Traktionsfachleuten gewünscht haben: bestes Netzverhalten, verbunden mit hohem Leistungsfaktor in allen Betriebsbereichen, guten Gesamtwirkungsgrad, optimales Adhäsionsverhalten und grösste Unterhaltsfreundlichkeit. Aus diesem knapp umrissenen Blick in die Zukunft mag hervorgehen, dass sich für die elektrische Traktionstechnik dank der konsequenten Verwendung der modernen Steuer- und Leistungselektronik ganz neue und höchst interessante Perspektiven eröffnen.

Literaturverzeichnis

[1] *Teich, W.:* «Dieselelektrische Triebfahrzeuge mit schleifringlosen Asynchron-Fahrmotoren». Elektrische Bahnen, Heft 4, 1972, S. 74 bis 88.

[2] *Brechbühler, M.* und *Stemmler, H.:* «Probleme bei der Entwicklung und Auslegung eines Oberleitungs-Versuchsfahrzeugs mit Asynchron-Fahrmotoren». Elektrische Bahnen, Heft 5, 1972, S. 106 bis 114.

[3] *Meyer, K.:* «Die Umrichter-Versuchslokomotive Be 4/4 12001 der SBB». SBB-Nachrichtenblatt, Heft 4, 1973, S. 63–66.

[4] *Brechbühler, M.* und *Bohli, W. U.:* «Erfahrungen mit der Versuchslokomotive Be 4/4 12001 der Schweiz. Bundesbahnen mit statischen Umrichtern». Brown Boveri-Mitteilungen, Heft 12, 1973, S. 581–588.

[5] *Weber, H. H.:* «Auswirkung der Achsfolgen Co'Co' und Bo'Bo'Bo' auf die Beanspruchung der Fahrbahn». Jahrbuch «Verkehrstechnik in der Schweiz» 1975/76, Nr. 14, S. 2–12.

[6] *Bitterberg, F.:* «DE 2500 – Ein Wendepunkt in der Lokomotivtechnik. Lokomotivtechnische Gesichtspunkte». Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 11, 1971, S. 441–448.

[7] *Gallois, J.:* «Development of a new combustion for low exhaust emissions». Diesel and Gas Turbine Progress, Nov./Dez. 1972.

[8] *Feulner, A.:* «Neue Kühlanlage für die Diesellokomotiv-Baureihe 218 der DB». Glasers Annalen ZEV 1975, Heft 12, S. 339–341, 347.

[9] *Stemmler, H.:* «Steuerverfahren für ein- und mehrpulsige Unterschwingungs-Wechselrichter zur Speisung von Kurzschlussläufermotoren». Dissertation TH Aachen, 1970.

[10] *Schönung, A.* und *Stemmler, H.:* «Geregelter Drehstrom-Umkehrantrieb mit gesteuertem Umrichter nach dem Unterschwingungsverfahren». Brown Boveri-Mitteilungen, Heft 8/9, 1964, S. 555–577.

[11] *Meyr, H., Ryser, H.* und *Zimmer, Ch.:* «Berührungslose Geschwindigkeitsmessung mittels Korrelationsverfahren». Hasler Mitteilungen, Heft 2, 1975, S. 33–47.

Adresse der Verfasser: Schweizerische Bundesbahnen, Abteilung Zugförderung und Werkstätten, Hochschulstrasse 6, 3000 Bern.