

Schaltung und Steuerung der Triebzüge Baureihe 420 der Deutschen Bundesbahn



Schaltung und Steuerung der Triebzüge Baureihe 420 der Deutschen Bundesbahn

1. Einleitung

Im Rahmen der Neuordnung des Nahverkehrs im Ballungsraum München soll bis zum Sommer 1972 ein leistungsfähiger S-Bahn-Verkehr aufgenommen werden, der die Inbetriebnahme von 120 dreiteiligen Nahverkehrstriebzügen erfordert.

Im Hinblick auf die große Zahl der in relativ kurzer Zeit zu bauenden Triebzüge und um alle Erfahrungen der Großfirmen der deutschen Elektroindustrie zu verwerten, erteilte die Deutsche Bundesbahn den Firmen AEG-TELEFUNKEN, BBC und Siemens den Auftrag, in Zusammenarbeit mit dem Bundesbahn-Zentralamt München die elektrische Ausrüstung zu entwickeln. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit war AEG-TELEFUNKEN verantwortlich für die Konzeption der Schaltung, für die Leistungselektronik, sowie für die Steuer- und Regelelektronik, die für sämtliche Züge dieser Baureihe von AEG-TELEFUNKEN geliefert wird.

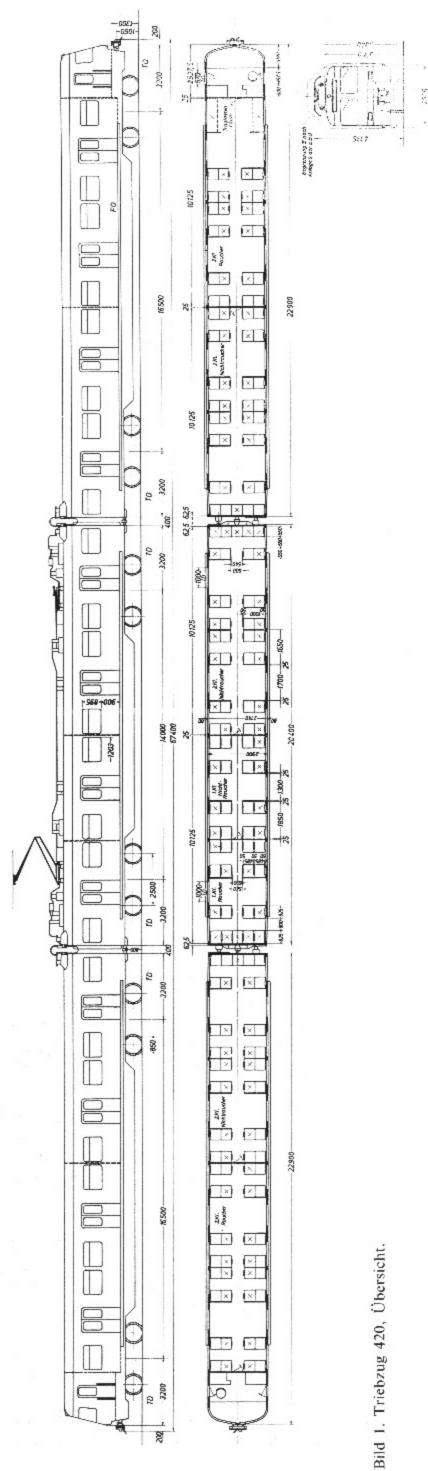
Die Auslegung der Antriebsausrüstung wurde vornehmlich durch zwei Forderungen der DB bestimmt:

 Antrieb aller Achsen wegen der im schnellen Nahverkehr erforderlichen hohen Anfahrbeschleunigung und Bremsverzögerung durch elektrische Bremse. 2. Einsparung von Wartungsarbeiten durch Anwendung einer kontaktlosen Steuerung.

Die gewählte Thyristorsteuerung mit einem Minimum an Leistung schaltenden Kontakten in den Starkstromkreisen und kontaktlosen Regelelementen in den Steuerstromkreisen kommt den Wünschen nach geringer Wartung weitgehend entgegen. Gleichzeitig erfüllt eine derartige Steuerung durch stufenlose Verstellbarkeit der Motorspannung die heutigen Komfortansprüche im Nahverkehr nach völlig ruckfreier Anfahrt. Auch besteht die Möglichkeit, auf relativ einfache Art Regelgrößen für Schleuderschutz, Gleitschutz, automatische Anfahrt und Zielbremse stetig und unverzögert in die Steuerung einzugeben.

Der Thyristorstromrichter erlaubt die Verwendung von Mischstrommotoren mit gegenüber Wechselstrommotoren kleinerem Volumen, vorteilhafterem Leistungsgewicht und niedrigerer Kommutatorbeanspruchung beim Anfahren.

Die Entscheidung, eine Thyristorsteuerung anzuwenden, obwohl die Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit nicht erlaubte, eine Erprobung in Prototypen durchzuführen, wurde begünstigt durch die guten Erfahrungen, die seit dem Jahre 1963 an verschiedenen mit Thyristorsteuerung ausgerüsteten Triebfahrzeugen gesammelt werden konnten.



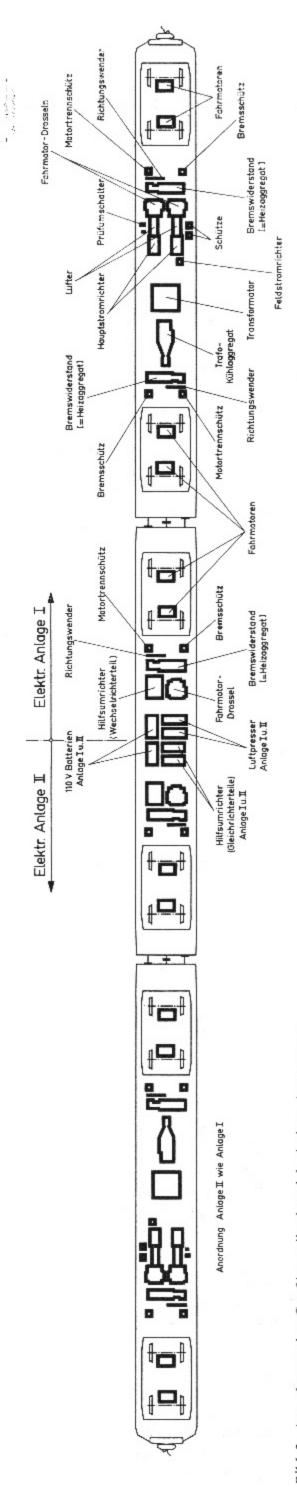
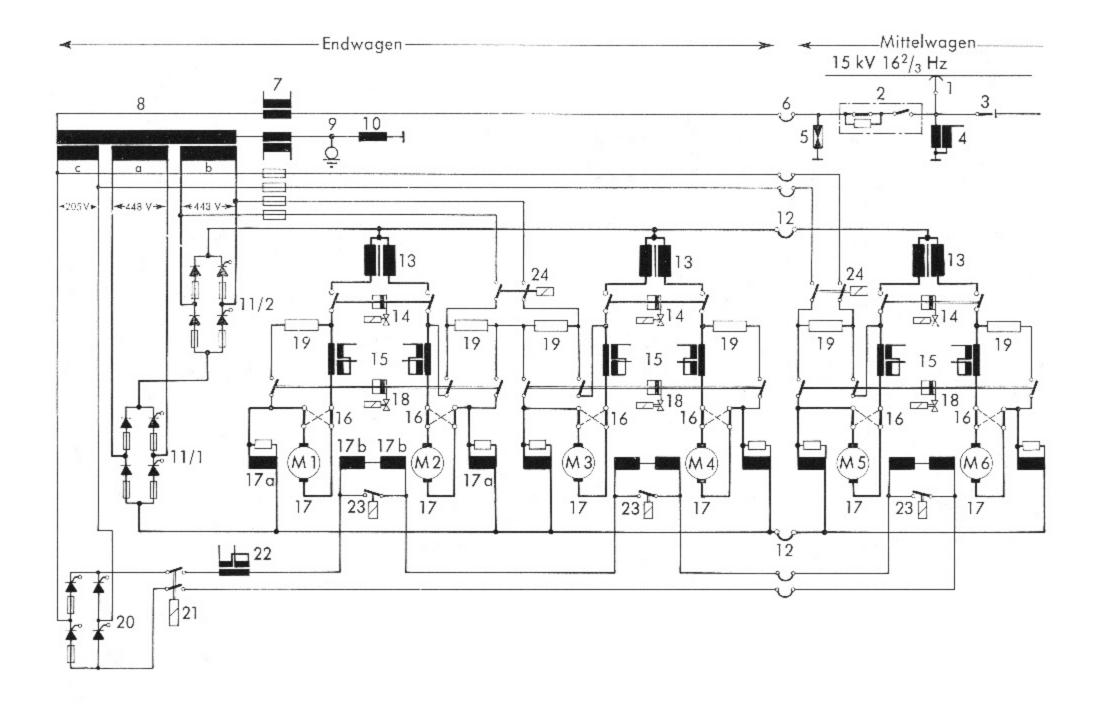


Bild 2. Anordnung der Großbauteile der elektrischen Ausrustung.

Tatzrollenlager	mit gefedertem Großrad	1:3,875	Thyristoranschnitt-	steuerung	elektr. Widerstandsbremse	mit automatischer	Druckluftzusatzbremse	bei geringer Fahrgeschwin-	digkeit
Antrieb		Übersetzung	Steuerung		Bremse				
575	3 3-teilige Einheiten		1 16 2/3 Hz, 15 kV	2400 kW (bzw. 3260 PS)	1,0 m/s ²	0,9 m/s ²	16 t	0,9 m/s2	12 Mischstrommotoren
Platze insgesamt	Vollzug		Stromsystem	Dauerleistung	Anfahrzugkraft (0-60 km/h)	Reisebeschleunigung (0-120 km/h	Bremskraft, elektr.	Bremsverzögerung (120-0 km/h)	Fahrmotoren
Bo'Bo'+Bo'Bo'+Bo'Bo'	120 km/h	1 m	850/780 mm	138 t	50 t	135 t	I. 33	1. 161	381
Achsanordnung	Höchstgeschwindigkeit	Fußbodenhöhe über SO.	Raddurchmesser	Eigengewicht	Gewicht der elektr. Ausrüstung	Besetztgewicht (Sitzplätze besetzt)	Sitzplätze 1. Kl.	2. KI.	Stehplätze



- 1 Stromabnehmer
- 2 Druckluftschnellschalter
- 3 Dachtrennschalter
- 4 Überspannungswandler
- 5 Überspannungsableiter
- 6 Hochspannungskupplung
- 7 Überstromwandler
- 8 Haupttransformator
- 9 Raderde
- 10 Erdschutzdrossel
- 11 Ankerstromrichter 1/2
- 12 Starkstromkupplung
- 13 Glättungsdrossel
- 14 Trennschütz
- 15 Gleichstromwandler (Anker)
- 16 Richtungswender
- 17 Fahrmotor
- 17a Reihenfeld
- 17b Fremdfeld
- 18 Bremsschütz
- 19 Bremswiderstand
- 20 Feldstromrichter
- 21 Schütz für Fremdfelder
- 22 Gleichstromwandler (Feld)
- 23 Schütz für Feldüberbrückung
- 24 Heizschütz

Bild 3. Hauptschaltbild.

2. Allgemeine Angaben

Der dreiteilige Triebzug wird durch zwölfeigenbelüftete Mischstrommotoren in Tatzrollenlagerbauart angetrieben. Die Dauerleistung beträgt je Fahrmotor 200 kW bei 72 km/h entsprechend 60% der Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h bei einer Nennspannung von 650 V und einem Dauerstrom von 335 A.

Um die Forderung nach Antrieb aller Achsen wirtschaftlich zu erfüllen, sind die Hauptbauteile für die Versorgung der Fahrmotoren wie Transformator, Stromrichter und Steuerelektronik nur in den Endwagen vorhanden.

Je zwei Fahrmotoren des Mittelwagens werden aus einem Endwagen mitversorgt. Der Mittelwagen trägt zum Gewichtsausgleich beide Hochspannungs- und beide Hilfsbetriebeanlagen. Damit bildet der Drei-Wagen-Zug die betrieblich kleinste Einheit. Bis zu drei dieser Einheiten können von einem Führerraum aus gesteuert werden.

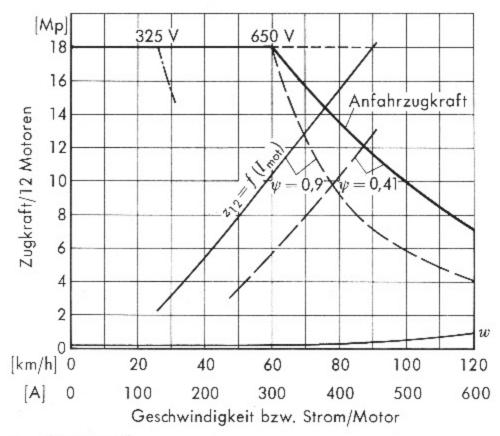
Das Zugkraft/Geschwindigkeit-Diagramm eines Triebzuges zeigt Bild 4.

Die Anfahrzugkraft von 18 Mp (Anfahrstrom 445 A je Motor) gestattet, bei einem Fahrzeuggewicht von 150 t bis zum Erreichen der vollen Motorspannung bei etwa 60 km/h eine Anfahrbeschleunigung von 1,0 m/s² einzuhalten. Von dieser Geschwindigkeit an wird durch stetige Feldsteuerung bei konstantem Ankerstrom die Leistung konstant gehalten, bis bei 84 km/h ein kleinster Erregergrad von 0,41 erreicht ist. Danach folgt die Zugkraft der Motorkennlinie für konstanten Erregergrad. Bei 120 km/h beträgt die Restzugkraft 7,1 Mp. Mit diesem Zugkraftverlauf wird die vorgeschriebene Reisebeschleunigung von 0,9 m/s² erreicht. Die Anfahrzeit bis 120 km/h beträgt etwa 43 s.

Die Bremskennlinien nach Bild 5 ermöglichen, daß die gewünschte Bremsverzögerung 0,9 m/s² von 120 km/h bis 0 beim Zuggewicht von 150 Mp mit Sicherheit eingehalten wird.

Die elektrische Bremse des Triebzuges 420 ist eine fremderregte Widerstandsbremse. Die Regelung folgt dabei der Regelgleichung:

Ankerstrom + Erregerstrom = 710 A = const.



 $\psi = \text{Erregergrad}$ w = Bewegungswiderstand

Bild 4. Zugkraftdiagramm.

Diese Summenregelung hat sich in den Triebzügen der Reihe 427 der DB bereits bestens bewährt. Gegenüber einer Produktregelung (Ankerstrom × Fluß), die im oberen Geschwindigkeitsbereich das Einhalten einer konstanten Bremskraft gestattet, hat sie den Vorteil einfacherer Erfassungsglieder, während der Bremskraftverlauf nicht wesentlich abweicht.

Infolge der durch die Verzögerung geringer werdenden Fahrmotordrehzahl nimmt bei der fremderregten Bremse auf einen konstanten Widerstand der Bremsstrom stetig ab.

Durch entsprechende Verstärkung der Erregung kann ein Abfall der Bremskraft verhindert werden. Unterhalb 53 km/h läßt sich der Fluß in den Fahrmotoren wegen der beginnenden Sättigung des Ständereisens nicht mehr wesentlich steigern. Der Erregerstrom wird deshalb auf 350 A konstant gehalten, die elektrische Bremskraft verläuft linear nach Null. Die Bremskraftverminderung wird über die Regelelektronik durch eine automatische Druckluftergänzungsbremse kompensiert, ohne daß der Fahrer eine zusätzliche Schalthandlung vornehmen muß. Da die Luftbremse erst bei kleinen Geschwindigkeiten wirksam wird und praktisch erst kurz vor dem Stillstand voll aufgesteuert ist, braucht nur etwa 6% der gesamten Energie einer Bremsung aus 120 km/h über die Druckluftbremse abgeführt zu werden. Die Bremszeit von 120 km/h bis zum Stillstand beträgt etwa 37 s, der Bremsweg 600 m.

Die gezeichneten Kurven stellen nur die für das Vertragsprogramm erforderliche Bremskraft dar. Infolge der Feldsteuerung über Thyristoren kann die Erregung stufenlos von Null bis zum Maximalwert verändert werden. Damit kann auch mit dem Fahrschalter stufenlos jede gewünschte Bremskraft unterhalb der Kennlinie eingestellt werden.

3. Starkstromausrüstung

Das Starkstromschaltbild einer der beiden gleichen Anlagen eines Triebzuges, d. h. Endwagen und halber Mittelwagen, zeigt Bild 3.

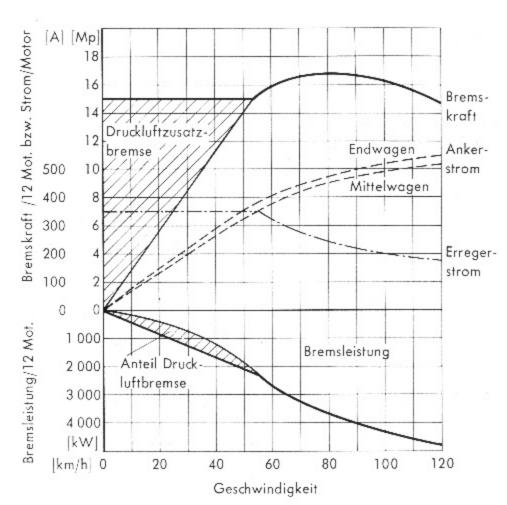


Bild 5. Bremskraftdiagramm.

Auf dem Mittelwagen sind zwei Stromabnehmer (1) vorhanden, die durch eine Dachleitung verbunden sind. Im Normalfall wird mit einem Stromabnehmer gefahren. Der abgesenkte Stromabnehmer wird durch einen mit ihm gekuppelten druckluftbetätigten Trennschalter von der spannungsführenden Dachleitung getrennt. Ein Trennschalter (3) gestattet, im Schadensfalle die beiden Anlagen auf der Hochspannungsseite zu trennen.

Als Hauptschalter ist für jede Anlage ein Druckluftschnellschalter DBTF 20 i 200 in Normausführung eingesetzt (2). Die
Oberspannung wird mit einem induktiven Spannungswandler (4) bereits vor dem Hauptschalter erfaßt, um dem Fahrer
sofort nach Anheben des Stromabnehmers zu melden, ob
Oberspannung vorhanden ist. Ein Überspannungsableiter (5)
schützt Transformator und Stromrichter nicht nur vor
Spannungsspitzen, die aus der Fahrleitung auflaufen, sondern auch vor Schaltüberspannungen, die durch das Abschalten des eigenen Transformators entstehen. End- und
Mittelwagen sind durch eine bewegliche Hochspannungskupplung (6) verbunden. Von hier führt über eine Dachdurchführung ein Hochspannungskabel mit Kunststoffisolation zum Haupttransformator (8).

Der Transformator mit einer Primärleistung von 1125 kVA besitzt für den Fahrbetrieb zwei unabhängige Sekundärwicklungen (Leerlaufspannung 448 V), an die je eine halbgesteuerte Brücke des Hauptstromrichters (11) für den Fahrbetrieb angeschlossen wird. Eine dritte Wicklung versorgt die Hilfsbetriebe mit 205 V.

Die Verstellung der Ausgangsspannung der Stromrichter erfolgt als Anschnittsteuerung stufenlos durch Verschiebung des Zündwinkels, d. h. der zeitlichen Lage des Zündimpulses innerhalb einer Halbwelle.

Die beiden Stromrichterbrücken werden nacheinander durchgesteuert, um den Leistungsfaktor des Fahrzeugs zu verbessern.

Der Stromrichter speist eine Sammelschiene, aus der die sechs parallel geschalteten Fahrmotoren (17) einer Anlage gemeinsam versorgt werden. Die Speisung aus einer Sammelschiene hat außer der günstigeren Auslegung des Stromrichters entscheidende Vorteile für seine Kurzschlußfestigkeit. Auch bedeutet der Ausfall einer Zelle wegen der größeren Zahl parallel geschalteter Zellen nur eine geringe Mehrbelastung der übrigen Zellen, so daß im allgemeinen hierbei noch keine Reduzierung des zulässigen Anfahrstromes notwendig ist.

Die zwei Fahrmotoren eines Drehgestells werden durch ein gemeinsames Trennschütz (14), Bremsschütz (18) und einen Richtungswender (16) zu einer Schaltgruppe zusammengefaßt (Bild 4). Da im Störungsfalle beide Motoren abgetrennt werden, ist es möglich gewesen, für je zwei Motoren eine gemeinsame Doppelglättungsdrossel (13) vorzusehen, die gegenüber zwei Einzeldrosseln eine wesentliche Gewichtsersparnis bringt.

Die Fahrmotoren haben zwei getrennte Feldwicklungen. Eine Wicklung (17a) ist mit dem Anker in Reihe geschaltet und wird vom Hauptstrom durchflossen. Diese Wicklung hat einen Anteil von etwa 40% an der Gesamterregung. Die zweite Wicklung (17b) wird fremderregt und gestattet eine stufen- und kontaktlose Feldsteuerung. Im Fahrbetrieb wird das anteilige Fremdfeld durch die Regelung proportional zum Ankerstrom erregt, so daß das für die Anfahrt günstige Reihenschlußverhalten der Motoren erhalten bleibt. Die Fremdfelder der sechs Motoren einer Anlage sind in Reihe geschaltet und werden über einen steuerbaren Feldstromrichter (20) aus der Hilfsbetriebewicklung des Transformators gespeist. Die gemeinsame Versorgung ist zulässig, da die anteilige Reihenschlußerregung die parallele Stromverteilung übernimmt. Bei reiner Fremderregung wäre eine Einzelversorgung und Steuerung jedes Feldes erforderlich gewesen, da nur so ein Parallelbetrieb möglich ist.

Der Feldstromrichter ist in vollgesteuerter Brückenschaltung ausgeführt, d. h. alle Zweige sind mit Thyristoren besetzt. Diese Schaltung gestattet bei Bedarf ein schnelles Verringern der Erregung, da die im Feldkreis enthaltene magnetische Energie im Wechselrichterbetrieb in das Netz zurückgespeist werden kann. Bei Ausfall eines oder beider Motoren eines Drehgestells können die Fremderregerwicklungen durch ein besonderes Schütz (23) überbrückt werden. Sollte die Fremderregung einmal ausfallen, ist ein Betrieb des Fahrzeuges mit verringerter Zugkraft über das Reihenschlußfeld allein möglich.

Beim Bremsen wird mit den Bremsschützen auf jeden Fahrmotoranker ein eigener Bremswiderstand geschaltet. Die Erregung erfolgt nur über die Fremdfelder, um günstige Regelbedingungen zu erhalten. Die beiden Bremswiderstände einer Motorgruppe sind in ein gemeinsames, fremdbelüftetes Gehäuse zusammen mit dem für Mischstrombetrieb erforderlichen Parallelwiderstand zum Motorreihenschlußfeld eingebaut.

Die Abwärme wird in der kalten Jahreszeit zum Heizen des Triebzuges verwendet. Steht für die Heizung keine Bremsenergie zur Verfügung oder reicht diese nicht aus (Vorheizen, lange Halteabstände, Bremsen aus kleiner Geschwindigkeit), wird die Heizenergie aus dem Transformator entnommen. Dazu wird jeweils ein Widerstand der beiden Gruppen des Endwagens in Reihe geschaltet über das Heizschütz (24) an eine Fahrwicklung gelegt. Die Heizenergie für den Mittelwagen liefert die Hilfsbetriebewicklung, um zusätzliche Kupplungsleitungen zu sparen.

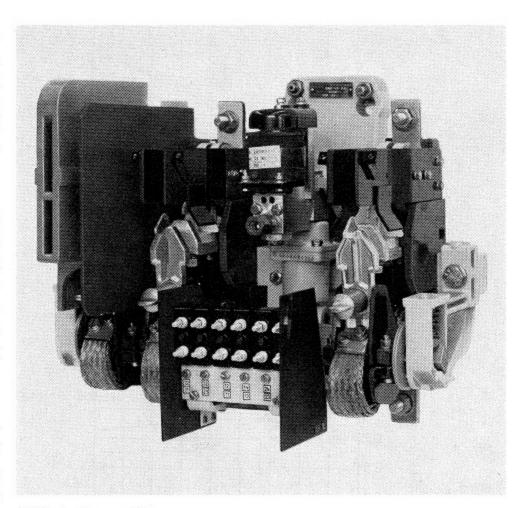


Bild 6. Trennschütz.

4. Leistungsfaktor und Wirkungsgrad

Immer wieder begegnet man der Ansicht, daß anschnittgesteuerte Stromrichteranlagen einen besonders schlechten Leistungsfaktor aufweisen müßten. Dabei wird oft übersehen, daß auch bei konventioneller Schaltwerkssteuerung mit Einphasenwechselstrommotoren der Leistungsfaktor erst mit höherer Geschwindigkeit besser wird. Bei Beginn der Anfahrt wird auch hier wegen des überwiegend induktiven Spannungsabfalls fast nur Blindleistung aufgenommen. Von Vorteil ist sowohl bei Schaltwerkssteuerung als auch bei Anschnittsteuerung, daß der Bereich des niedrigen Leistungsfaktors mit einer relativ geringen Leistungsaufnahme des Fahrzeuges zusammentrifft.

Durch eine Reihe von nachfolgend angegebenen Maßnahmen wird für die Anfahrt bis etwa 100 km/h — also dem im Nahverkehr meistgefahrenen Geschwindigkeitsbereich — etwa der gleiche Verlauf des Leistungsfaktors für den Triebzug 420 erreicht, wie er sich für ein Fahrzeug mit Wechselstrommotoren unter gleichen Verhältnissen ergeben würde.

a) Halbgesteuerte Brückenschaltung

Bei der halbgesteuerten Brückenschaltung sind zwei Brükkenzweige mit Thyristoren und zwei Zweige mit Dioden bestückt. Die Dioden ermöglichen während der Anschnittpausen einen Freilauf für den Gleichstrom, der auf Grund der Glättungsinduktivität auch nach dem Nulldurchgang der Netzspannung weiterfließen möchte. In der Zeit, in der die folgende Halbwelle noch gesperrt ist, fließt deshalb kein Strom durch die Transformator-Sekundärwicklung. Der Stromfluß im Netz endet mit dem Spannungsnulldurchgang. Dadurch verschiebt sich die Grundwelle des Oberstromes nach vorn, und es wird weniger Blindstrom aufgenommen.

b) Folgesteuerung

Eine weitere Verbesserung des Leistungsfaktors wird dadurch erreicht, daß zwei aus verschiedenen Transformatorwicklungen versorgte Stromrichterbrücken in Reihe geschaltet werden. Steuert man diese nacheinander aus, ergibt sich schon bei halber Motorspannung für die erste Brücke

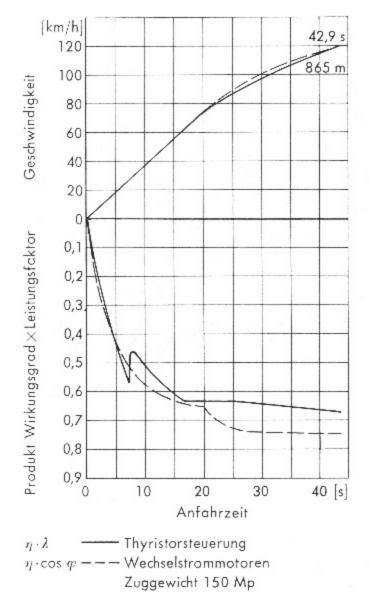


Bild 7. Leistungsfaktor.

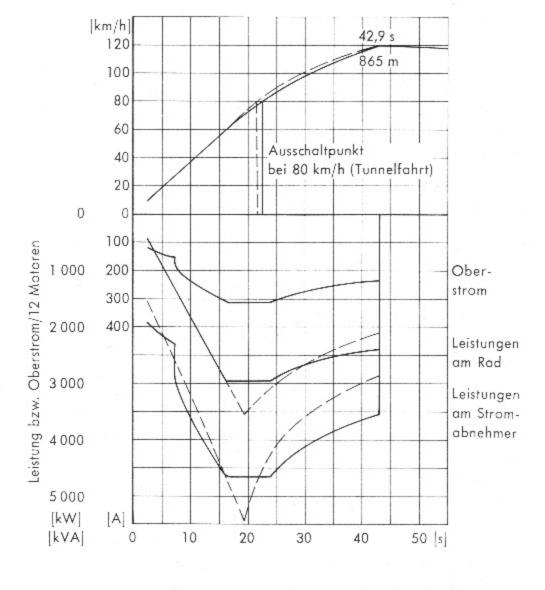


Bild 8. Leistung an Rad und Stromabnehmer.

Vollaussteuerung mit einem Blindleistungsminimum. Wird anschließend die zweite Brücke durchgesteuert, bleibt die erste Brücke im Endzustand und wirkt wie ein Diodengleichrichter.

c) Niedriger Dauerpunkt des Fahrmotors

Bei Wechselstrommotoren nimmt die Zugkraft auf der obersten Spannungsstufe dem Verlauf der natürlichen Kennlinie folgend relativ schnell ab. Um im oberen Geschwindigkeitsbereich noch eine genügende Zugkraft zu haben, wird deshalb eine Triebwagenausrüstung gewöhnlich so ausgelegt, daß während der Anfahrt die maximale Spannung erst etwa bei 70% der Höchstgeschwindigkeit erreicht wird. Mischstrommotoren lassen dagegen wie Gleichstrommotoren zu, daß nach Erreichen der vollen Motorspannung durch Feldsteuerung noch in einem beträchtlichen Geschwindigkeitsbereich die Leistung konstant gehalten werden kann. Damit kann die Auslegung so getroffen werden, daß die volle Spannung bereits bei etwa 50% Höchstgeschwindigkeit erreicht und damit der Bereich des niedrigen Leistungsfaktors relativ schnell durchfahren wird.

d) Geringe Kurzschlußspannung des Transformators

Einen erheblichen Anteil an der aufgenommenen Blindleistung haben die induktiven Spannungsabfälle im Transformator. Die Kurzschlußspannung, die als wesentlichen Anteil die induktive Verlustspannung enthält, wurde deshalb mit etwa 7% bei Transformatornennstrom so gering gehalten, wie es mit Rücksicht auf den konstruktiven Aufwand am Transformator und die Kurzschlußfestigkeit des Stromrichters vertretbar ist.

Unter Berücksichtigung der sich aus der Vorausberechnung ergebenden Verluste der einzelnen Bauteile wie Fahrmotoren, Glättungsdrosseln, Stromrichter und Transformator wurde die in Bild 7 dargestellte Kurve für das Produkt $\eta \cdot \lambda$ (Wirkungsgrad × Leistungsfaktor) berechnet, mit der es möglich ist, den zu erwartenden Oberstrom zu bestimmen. Zum Vergleich ist in dieses Bild der Verlauf der entsprechenden Kurve für ein Fahrzeug mit Schaltwerk und Wechselstrommotoren eingetragen, wie sie bei gleicher Fahrleistung, d. h. gleichen Anfahrwegen und -zeiten bei gleichem Fahrzeuggewicht, zu erwarten wäre. Hierzu wurden die Leistungen des 1964 für die DB nach modernsten Grundsätzen gebauten Triebzuges 427 hochgerechnet, so daß sich die gleiche mittlere Beschleunigung von 0,9 m/s wie beim Triebzug 420 ergibt. Dabei wurde nicht berücksichtigt, ob sich die errechnete Leistung bei Verwendung von Wechselstrommotoren in den vorhandenen Einbauraum tatsächlich einbauen läßt.

Aus der Zugkraftkennlinie (Bild 4) läßt sich nach der Formel

$$N = c_1 \cdot Z \cdot V$$

die Leistung des Triebzuges am Rad und unter Berücksichtigung des Fahrzeugwirkungsgrades die Scheinleistung am Stromabnehmer bestimmen.

Diese Scheinleistung sowie der sich bei Fahrdrahtnennspannung von 15 kV ergebende Oberstrom sind in Bild 6 dargestellt. Auch hier sind zum Vergleich die Kennlinien einer umgerechneten Wechselstromausrüstung eingetragen. Die Leistungsspitze für dieses Fahrzeug ergibt sich, weil bei Wechselstrommotoren Feldschwächung nicht angewandt wird, sondern die Zugkraft durch weitere Steigerung der Spannung aufrechterhalten werden kann. Bei Bewertung der Leistungsaufnahme und des Leistungsfaktors bei 120 km/h ist zu berücksichtigen, daß beim Triebzug 420 die Leistung am Rad bei dieser Geschwindigkeit durch die spezifische Lage der Kennlinie größer und damit die stromabhängigen Verluste höher sind als bei dem umgerechneten Triebzug 427.

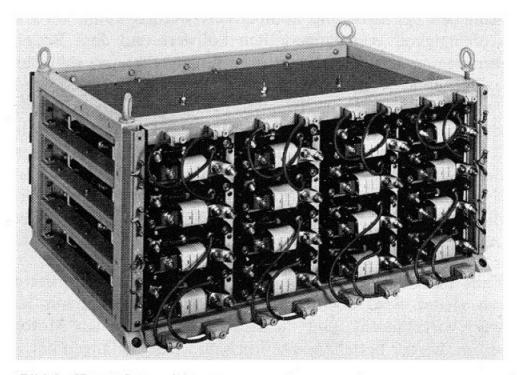


Bild 8. Haupt-Stromrichter.

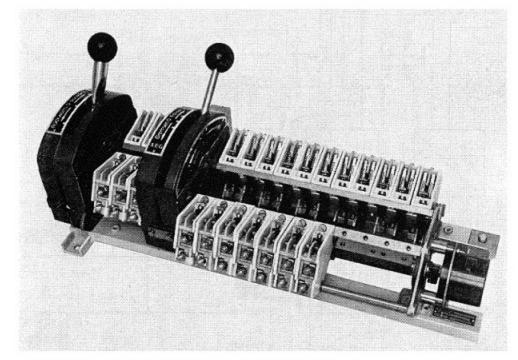


Bild 10. Fahrschalter.

5. Hauptstromrichter

Der Hauptstromrichter wurde entsprechend den Erfordernissen von Fahrprogramm und Motoren für folgende Leistungen ausgelegt:

Nenngleichspannung					٠			2.*3		650 V
Nenngleichstrom										
höchster Anfahrstrom	(1	n	nir	1)						2800 A

Wie aus dem Hauptschaltbild hervorgeht, werden für die Nenngleichspannung von 650 V zwei halbgesteuerte Gleichrichterbrücken in Reihe geschaltet. Jede Brücke ist für die halbe Spannung und den vollen Anfahrstrom ausgelegt. Mit Rücksicht auf die Spannungsschwankungen im Fahrdraht, dem Scheitelfaktor der Wechselspannung und einem Sicherheitsfaktor sind bei einer Leerlaufspannung von 448 V bei 15 kV Oberspannung Zellen mit einer maximalen Sperrspannung von 1350 V eingebaut. Je Brückenzweig sind acht Zellen parallel geschaltet. Ein Ankerstromrichter enthält 16 Thyristoren und 16 Dioden. Der Dauernennstrom der einzelnen Thyristoren beträgt etwa 200 A, der der Dioden etwa 300 A. Die Diodenzweige sind für einen höheren Dauerstrom ausgelegt, da sie im Teilaussteuerungsbereich zusätzlich mit dem Freilaufstrom belastet sind.

Jeweils ein Thyristor und eine Diode sind in einem steckbaren Doppelbaustein zusammengefaßt. Die Bausteine werden seitlich durch die Wagenschürze in ein Gestell eingeschoben, das auf der Rückseite die Schaltverbindungen trägt (Bild 9). Bei der Anordnung der Schaltverbindungen wurde besonderer Wert auf gleiche Spannungsabfälle der Zu- und Ableitungen für alle Zellen gelegt, um eine gute Parallelaufteilung des Stromes auf alle Zellen zu erreichen. Der Anschluß der Starkstromleitungen erfolgt über Steckkontakte auf der Rückseite der Bausteine. Die Steuerleitungen werden von vorn über Vielfachstecker angeschlossen.

6. Schutz des Stromrichters

Gegen Überspannungen sind die Stromrichter durch folgende Einrichtungen geschützt:

1. Überspannungsableiter auf der 15-kV-Seite mit einer Ansprechwechselspannung von 35 ... 40 kV

- Überspannungsableiter auf der Transformatorsekundärseite an jeder Fahrwicklung mit einer Ansprechspannung von etwa 950 V
- Bedämpfung jeder Transformatorsekundärwicklung mit einer Kondensatorwiderstandsbeschaltung. Diese Bedämpfung ist über Gleichrichter angeschaltet, um hohe Umladeverluste zu vermeiden.
- 4. Kapazitive Erdung einer Transformatorsekundärwicklung
- Beschaltung der einzelnen Thyristoren und Dioden mit Bedämpfungsgliedern, die aus Widerständen und Kondensatoren bestehen.

Zum Schutz gegen Überströme und äußere Kurzschlüsse sind in den Wechselstromeingängen des Stromrichters Wandler eingesetzt, die bei Strömen von mehr als den 1,5fachem Anfahrstrom den Fahrzeughauptschalter auslösen. Der Stromrichter ist in seiner Kurzschlußfestigkeit so bemessen, daß er die bis zur Abschaltung auftretenden Ströme ohne schädliche Folgen verträgt. Zum Schutz gegen innere Schäden sind den einzelnen parallelen Strängen Sicherungen vorgeschaltet. Sie haben die Aufgabe, bei eventueller Durchzündung oder Verlust der Sperrfähigkeit einer Zelle diese selektiv herauszuschalten. Damit bleibt der Stromrichter weiter betriebsfähig. Die Anzeige einer ausgefallenen Sicherung erfolgt über ein parallel geschaltetes Relais, das ein Signal auf den führenden Führerraum gibt.

7. Fahr-Brems-Steuerung und Regelung

Die Fahrsteuerung wird über einen liegend im Führertisch eingebauten Fahrschalter (Bild 10) mit mechanisch gegeneinander verriegelter Richtungs- und Fahrbremswalze betätigt. Beim Bewegen des Fahrhebels in Fahrrichtung wird das Fahrkommando, beim Bewegen zum Fahrer hin das Bremskommando gegeben. Nach beiden Richtungen schließt sich an eine Raststellung, in der die Fahr- bzw. Bremsschaltung im Starkstromkreis hergestellt wird, ein stufenlos einstellbarer Bereich an, in dem die gewünschte Zug- oder Bremskraft eingestellt werden kann.

Für Fahren und Bremsen wird eine Stromregelung angewendet. Beim Fahren wird entsprechend der Auslenkung des Fahrhebels ein proportionaler Sollwert vorgegeben, der in

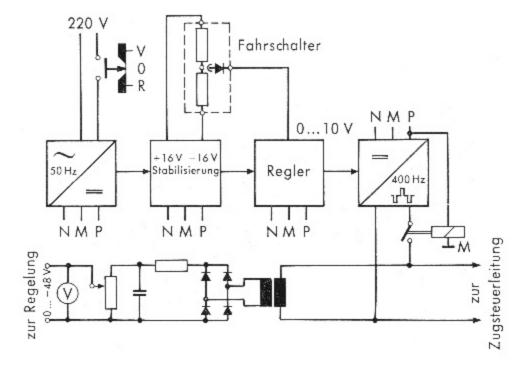


Bild 11. Sollwerterzeugung und Umsetzung.

einem Regelverstärker mit dem über Gleichstromwandler erfaßten Istwert des Ankerstromes verglichen wird. Die Differenz zwischen Soll- und Istwert beeinflußt über eine Steuerung die Lage der Zündimpulse für den Thyristorstromrichter so, daß der vorgegebene Ankerstrom fließt. Für die zwei Teilstromrichter, die nacheinander durchgesteuert werden, sind zwei gleiche, parallele Steuereinrichtungen vorhanden.

Um die Fremderregung der Fahrmotoren proportional zum Ankerstrom regeln zu können, wird der Istwert des Ankerstromes als Sollwert für die Feldregelung verwendet. Der Feldsollwert wird in einem Regler gleichen Typs wie bei der Ankerstromregelung mit dem Istwert des Fremderregerstromes verglichen. Die Differenz bewirkt über eine Steuerung, die analog der Ankersteuerung aufgebaut ist, die Verstellung des Zündzeitpunktes für den Feldstromrichter.

Anker- und Fremderregerstrom werden bis zum Erreichen der vollen Motorspannung konstant auf dem mit dem Fahrschalter eingestellten Wert gehalten. Ist die Vollaussteuerung des Ankerstromrichters fast erreicht, wird die Feldsteuerung freigegeben. Über eine Transistorstufe wird der Sollwert für die Feldregelung kontinuierlich geshuntet und die Fremderregung stufenlos verringert, während der volle Ankerstrom erhalten bleibt. Erst wenn der kleinste Erregergrad erreicht ist, beginnt der Ankerstrom entsprechend der Motorkennlinie zurückzugehen.

Beim elektrischen Bremsen ist der Ankerstromrichter außer Betrieb. Der mit dem Fahrschalter vorgegebene Sollwert wird direkt in den Feldregler gegeben und dort mit den gleichzeitig eingegebenen Istwerten von Anker- und Feldstrom verglichen. Die Istwerte von Anker- und Feldstrom wirken als Summe. Ist diese Summe kleiner als der Sollwert, verstärkt der Regler die Erregung in den Fahrmotoren. Ist die Summe größer, verringert der Regler die Erregung. Geht also mit sinkender Geschwindigkeit beim Bremsen der Ankerstrom zurück, verstärkt der Regler den Erregerstrom, so daß die Summe konstant und die eingestellte Bremskraft erhalten bleibt. Bei kleiner eingestelltem Sollwert regelt die Bremseinrichtung auf eine kleinere Summe und eine kleinere Bremskraft. Damit können die Bremskräfte stufenlos eingestellt werden.

Geht im unteren Geschwindigkeitsbereich die Bremskraft stetig zurück, da der fallende Bremsstrom nicht mehr durch Anheben der Erregung kompensiert werden kann, wird in Abhängigkeit vom eingestellten Sollwert und dem Bremsstrom eine Druckluftbremskraft hinzugefügt, so daß eine weitgehende Konstanthaltung der Bremskraft erzielt wird. Jede Veränderung des Bremssollwertes wird auch auf die Druckluftergänzungsbremse übertragen. Die pneumatische Bremse ersetzt so immer den Anteil an der Gesamtbremskraft, der abhängig vom eingestellten Sollwert fehlt. Im Extremfall, d. h. beim Ausfall der elektrischen Bremse, wird die gesamte Bremskraft, steuerbar durch den Fahrschalter, von der Druckluftbremse übernommen.

Falls ein Motor beim Anfahren schleudert oder beim Bremsen gleitet, wird über einen Schlupfregler ein höherer Istwert vorgetäuscht, und die Regler verringern den Motorstrom, bis der betreffende Motor sich wieder gefangen hat.

8. Steuer- und Regelelektronik

a) Sollwert (Erzeugung und Umsetzung)

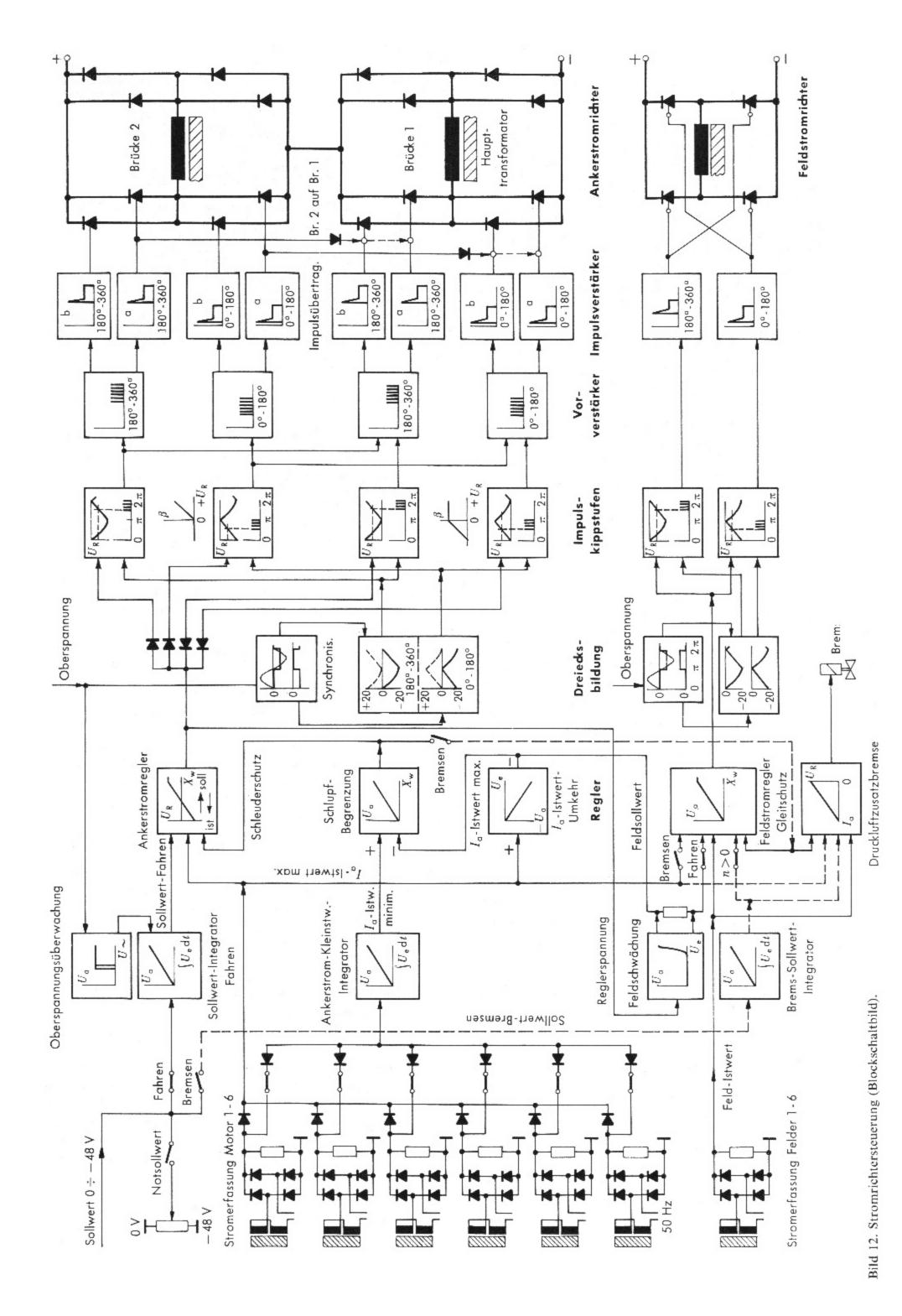
Am Fahrschalter angebaut ist ein kontaktlos arbeitendes, verschleißfreies Sollwertpotentiometer, das je nach Fahr-Bremshebelstellung eine Spannung zwischen 0 und 10 V abgibt. Das Potentiometer enthält einen Halbleiter, der seinen elektrischen Widerstand in Abhängigkeit von einem ihn durchsetzenden Magnetfeld ändert.

Der eingestellte Sollwert muß über durchgehende Steuerleitungen an alle Antriebsanlagen eines Zuges unverfälscht übertragen werden, d. h. maximal sechs Regelungen bei einem Zugverband von drei dreiteiligen Einheiten von insgesamt etwa 210 m Länge. Es dürfen weder Spannungsabfälle durch verschmutzte Steuerstromkupplungen auftreten, noch sollen sich eventuell aufgenommene Störspannungen auswirken. Außerdem soll der Anschluß der einzelnen Regler möglichst galvanisch getrennt erfolgen.

Um diese Bedingungen zu erfüllen, wird die vom Fahrschalterpotentiometer abgegebene Gleichspannung in rechteckige Wechselspannungsimpulse konstanter Amplitude und Frequenz umgeformt, deren Impulsbreite sich proportional zur Potentiometerspannung ändert. Die Spannungsamplitude beträgt 220 V, die Frequenz 400 Hz. Diese Wechselspannung wird über die Zugsteuerleitung an alle angeschlossenen Anlagen weitergeleitet. Durch Transformation, Gleichrichtung und Glättung wird dann für jede Regelung potentialfrei eine Gleichspannung gewonnen, die dem Ursprungssollwert proportional ist und in den Grenzen 0 bis — 48 V als Sollwert für die Regler dient (Bild 11).

b) Sollwertverriegelung

Bei Ausfall des Sollwertumsetzers kann über ein Relais in jeder Anlage, das nach einer Umschaltung ebenfalls über den Fahrschalter angesteuert wird, ein interner Not-Sollwert eingespeist werden, der halb so groß ist wie der maximale Sollwert (— 24 V). Die Auswahl des Sollwertes für Fahren und Bremsen erfolgt mit Relais, die gemeinsam mit dem Trennschütz oder dem Bremsschütz geschaltet werden. Beim Fahrbetrieb wird der Sollwert über einen Integrator geführt, der schnelle Sollwertänderungen soweit dämpft, daß Zugkraftübergabe ohne Ruck erreicht werden. Der Integrator wird durch eine Kippstufe überwacht, die von der Oberspannung beeinflußt wird. Bei Ausfall der Oberspannung durch Unterbrechung der Fahrdrahtspannung oder starkes Stromabnehmerspringen wird unabhängig von der Fahrschalterstellung der Sollwert am Ausgang des Integrators auf Null



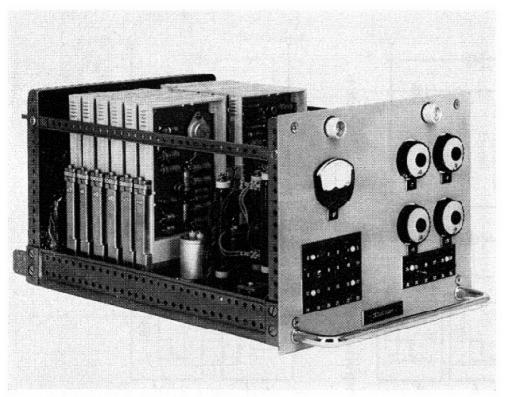


Bild 13. Einschub Impulserzeugung.

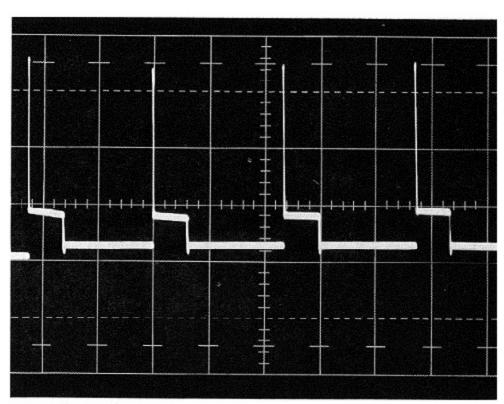


Bild 14. Zündimpulse.

zurückgeführt (Nullstellungszwang). Bei Wiederkehr der Fahrdrahtspannung steigt dann der Sollwert linear von Null aus gedämpft wieder an.

c) Istwerte (Bild 12)

Durch sechs Gleichstromwandler werden die Ankerströme der sechs Fahrmotoren einer Anlage erfaßt. Gleichstromwandler sind Meßwandler, die es gestatten, Gleichströme potentialfrei zu messen. Gegenüber Shunts ist die erreichbare Meßleistung etwa 100fach größer, während der Eigenverbrauch nur etwa 10 bis 15% eines Shunts beträgt. Zwei magnetisch hochwertige Bandringkerne tragen die Sekundärwicklung, die mit 50 Hz erregt wird. Das Kabel für den Motorstrom ist durch den Wandler hindurchgeführt. Im Ruhezustand, wenn kein Motorstrom fließt, nimmt die Erregerwicklung wegen des hohen induktiven Widerstandes nur einen Magnetisierungsstrom von wenigen mA auf, Fließt dagegen ein Motorstrom, werden die Ringkerne vormagnetisiert, und durch die Erregerwicklung fließt ein rechteckförmiger Wechselstrom, der dem Motorstrom proportional ist. Die Wandler übersetzen im Verhältnis 500:0,33 A. Die Ausgangsströme werden in Zwischenwandlern nochmals im Verhältnis 1:5 untersetzt (nicht dargestellt), gleichgerichtet und geglättet. Sie verursachen an sechs gleichen Meßwiderständen je einen Spannungsabfall, der dem entsprechenden Motorstrom proportional ist. Über Dioden in Sternschaltung werden alle Meßspannungen parallel geschaftet. Da die Eingänge in die Regelung sehr hochohmig sind, wirkt sich immer nur der höchste Meßwert aus. Das heißt, der Istwert und damit die Regelung werden immer von dem Motor bestimmt, der den höchsten Motorstrom aufnimmt. Wird eine Motorgruppe abgeschaltet, ändert sich der Istwert für die Regelung nicht.

d) Schleuder- und Gleitschutz

Die gewählte Schaltung der Fahrmotoren mit geteilten Feldern neigt wegen der Reihenschaltung der Fremdfelder nur wenig zum Schleudern. Da der Fremderregerstrom über den Istwert des Motors mit der höchsten Stromaufnahme geführt wird, bleibt beim Schleudern eines Motors der überwiegende Fremderregeranteil konstant. Damit steigt die EMK des betreffenden Motors schon bei geringen Drehzahlunterschieden. Der aufgenommene Strom und die Zugkraft

sinken verhältnismäßig stark, da auch die Spannung der speisenden Sammelschiene durch den führenden Motor konstant gehalten wird (Nebenschlußverhalten).

Trotz dieses günstigen Verhaltens wurde mit Rücksicht auf den S-Bahn-Einsatz und den vorgesehenen automatischen Betrieb eine zusätzliche Schlupfüberwachung vorgesehen. Sie basiert auf einem Vergleich des höchsten Motorstromes (Maximal-Istwert) mit dem kleinsten Motorstrom (Minimal-Istwert), der sich beim Schleudern eines Motors ergibt. Um den Minimal-Istwert zu erfassen, wird über einen hochohmigen Vorwiderstand eine Zusatzspannung auf die sechs Istwertwiderstände geschaltet. Über Sperrdioden fließt dann ein Zusatzstrom über den Istwertwiderstand, der den geringsten Motorstrom zu tragen hat und den geringsten Spannungsabfall aufweist. Die anderen Widerstände führen keinen Zusatzstrom, da ihr Eingangspotential durch den größeren Motorstrom höher liegt. Der nachgeschaltete Integrator stellt sich mit seiner Ausgangsspannung immer auf das niedrigste Potential ein und liefert ein Abbild des kleinsten Motorstromes, das in der Regelung verarbeitet werden kann, z. B. beim Schleudern eines Motors, wenn dessen Strom zurückgeht. Die Minimalkreise müssen aufgetrennt werden, falls eine Motorgruppe abgeschaltet wird. Da in diesem Kreis kein Motorstrom fließt, würde das Potential sonst auf Null abgesenkt werden, starkes Schleudern melden und die Regelung beeinflussen.

Maximaler und minimaler Istwert werden in einem Regelverstärker verglichen. Normalerweise unterscheiden sie sich nur geringfügig infolge Fertigungstoleranzen der Motoren, auf die der Regler nicht anspricht. Wird die eingestellte Toleranz überschritten, gibt der Regler eine Ausgangsspannung ab, die beim Fahren im Ankerstromregler, beim Bremsen im Feldstromregler einen überhöhten Istwert vortäuscht und ein Rückstellen veranlaßt. Versuche mit ähnlicher Regelung an anderen Triebwagen haben ergeben, daß der Ansprechwert nicht zu empfindlich eingestellt werden darf, da sonst bei schlechten Bedingungen der vorhandene Haftwert nicht optimal genutzt wird, sondern Zugkraft oder Bremskraft zu früh zurückgestellt werden.

e) Ankerstromregler

Der vorgegebene negative Sollwert wird im Ankerstromregler mit dem positiven Istwert verglichen. Die Differenz erzeugt eine Reglerausgangsspannung, die abhängig vom Aussteuerungszustand des Stromrichters zwischen $-20 \,\mathrm{V}$ über 0 bis $+20 \,\mathrm{V}$ betragen kann. Diese Spannung dient zur Führung der Impulserzeuger für den Ankerstromrichter.

Wird beim Anfahren ein Sollwert vorgegeben, steigt die Ausgangsspannung des Reglers von — 20 V an und verlegt den Anschnittwinkel der Ankerstromrichterbrücke vor, so daß der Ankerstrom fließt und die Differenz Sollwert—Istwert ausgeglichen wird. Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit steigt die Reglerspannung weiter an und hält den Anfahrstrom aufrecht. Bei Reglerspannung 0 V ist die Brücke 1 voll ausgesteuert. Bei weiterem Anstieg der Reglerspannung wird anschließend auch die Brücke 2 durchgesteuert, dabei bleibt die Brücke 1 weiterhin voll ausgesteuert.

f) Impulserzeugung (Bild 13)

Die Impulserzeugung stellt das Bindeglied zwischen Regelung und Stromrichter dar. In ihr wird die vom Regler abgegebene Steuerspannung in einen für den Stromrichter benötigten Steuerwinkel umgewandelt. Dazu wird die Reglerspannung vier Impulskippstufen, je eine für jede Brücke und jede Halbwelle, zugeführt. Sie ist über Dioden so abgeblockt, daß die Kippstufen für die erste Brücke nur eine negative Steuerspannung, die der zweiten Brücke nur eine positive Steuerspannung erhalten. Damit ist sichergestellt, daß die Stromrichter nacheinander in richtiger Folge durchgesteuert werden.

Als Gegenspannung wird in die Kippstufen noch eine mit der Oberspannung synchronisierte Dreieckspannung eingegeben. Für jede Stromrichterbrücke werden zwei um 180° phasenverschobene Dreieckspannungen benötigt, deren Spannung in einer Halbwelle für Brücke 1 von 0 bis + 20 V, für Brücke 2 von — 20 V bis 0 V linear ansteigt. Erreicht die von 0 auf + 20 V ansteigende Dreieckspannung (Brücke 1) die Höhe der negativen Reglerspannung, erzeugt die Kippstufe eine Impulskette, die anschließend verstärkt wird.

Gibt der Ankerstromregler bei höherer Fahrgeschwindigkeit eine positive Ausgangsspannung ab, führt der Vergleich mit der negativen Dreieckspannung auch in den Kippstufen der zweiten Brücke zur Erzeugung einer Impulskette. Um eine synchrone Zündung der Brücke 1 beim Ansteuern der Brücke 2 sicherzustellen, werden die Impulsketten der zweiten Brücke auch auf die Vorverstärker der ersten Brücke übertragen.

Die von den Vorverstärkern abgegebenen Impulse werden in Endverstärkern auf die zur Zündung Thyristoren benötigte Leistung verstärkt. Jeder Impulsverstärker liefert die Zündimpulse für vier Thyristoren eines Brückenzweiges. Für jeden Brückenzweig sind also zwei Impulsverstärker notwendig. Das hat den Vorteil, daß bei Ausfall eines Verstärkers noch mit vier Thyristoren in einem Zweig weiter gefahren werden kann. Die Impulsverstärker versehen jeden Impuls einer Kette mit einer Impulsspitze großer Steilheit, die ein exaktes, gleichzeitiges Zünden aller parallel geschalteten Thyristoren sicherstellt. Auch diese Impulsspitzen werden am Ausgang der Impulsverstärker von Brücke 2 auf Brücke 1 übertragen. Die Form der endgültigen Zündimpulse zeigt Bild 14.

g) Feldregler

Um beim Fahren die Fremderregung der Fahrmotoren proportional zum Ankerstrom regeln zu können, wird der Istwert des Ankerstromes als Feldsollwert in den Feldregler gegeben. Ein Eingangswiderstand ist durch den Feldschwäch-

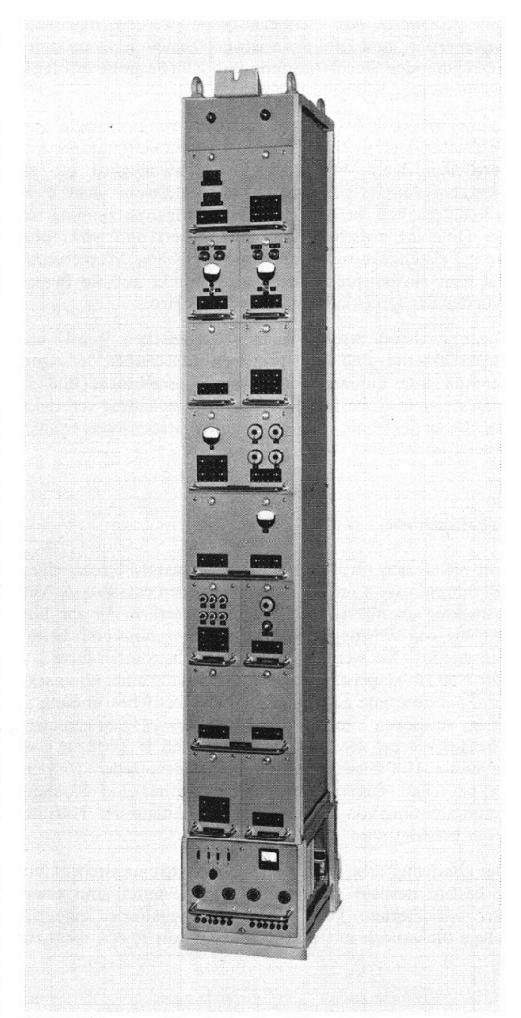


Bild 15. Schrankgestell mit den Einschüben für Regelung und Steuerung.

regler überbrückt. Als Gegenspannung wird dem Feldregler der ebenfalls über einen Gleichstromwandler erfaßte Istwert des Feldstromes zugeführt. Im Regler wird wie bei der Ankerregelung aus der Differenz von Soll- und Istwert eine Ausgangsspannung erzeugt, die sich im Bereich von 0 V bis + 20 V bewegt und die als Steuerspannung zur Erzeugung der Zündimpulse für den Feldstromrichter analog der Impulserzeugung für den Ankerstromrichter dient. Hat im Laufe einer Anfahrt der Ankerstromregler auf 95 % seiner Endspannung aufgesteuert, ist also die volle Motorspannung bis auf etwa 98 % erreicht, beginnt der Feldschwächregler zu sperren. Damit wird der Eingangswiderstand für den Sollwert in dem Feldregler vergrößert. Der Sollwert wird kontinuierlich verringert, die Fahrmotorfremderregung geschwächt.

Beim Bremsen wird der mit dem Fahrschalter vorgegebene Sollwert direkt in den Feldregler gegeben. Auch hierbei werden durch einen Sollwert-Integrator schnelle Änderungen gedämpft. Als Vergleichsgröße werden maximaler Ankerstrom- und Feldstrom-Istwert gemeinsam verwendet. Erzeugung der Steuerspannung und Zündimpulse erfolgt in gleicher Weise wie beim Fahren.

Bremssollwert und Ankerstrom-Istwert werden parallel zum Feldregler noch in einem Regler für Druckluftzusatzbremse verglichen. Kann bei niedriger Geschwindigkeit die gewünschte Summe von Anker- und Feldstrom nicht mehr aufrechterhalten werden, steigt die Ausgangsspannung mit der Differenz zwischen Soll- und Istwert und wirkt über einen Leistungstransistor auf ein einstellbares Magnetventil, mit dem ein entsprechender Druck direkt auf die Bremszylinder der Druckluftbremse gegeben wird.

Die vorstehend beschriebenen elektronischen Regel- und Steuerelemente sind in steckbaren Einschüben in einem Schrank in der Führerraumrückwand untergebracht (Bild 15). Abgeschirmte Kabel für die Zündimpulszuleitung verbinden die Steuerelektronik mit den beiden Stromrichterbrücken unter dem Wagen.

9. Hilfsbetriebe

Um die in den Großgeräten Transformator, Stromrichter, Glättungsdrosseln und Bremswiderständen entstehende Verlustwärme abzuführen sind Lüfter erforderlich, die zur Einsparung von Wartungsarbeit mit Asynchronmotoren betrieben werden. Sie werden aus einem Drehstrombordnetz 3 × 220 V 50 Hz gespeist. Es lag bei Anwendung einer kontaktlosen Fahrsteuerung nahe, auch die Hilfsbetriebespannung in einem statischen Umrichter aus 200 V 162/3 Hz zu erzeugen. Ebenso wie bei der Fahrausrüstung sind je Triebzug zwei getrennte Hilfsbetriebeanlagen vorhanden. Jeder Umrichter hat eine Nennleistung von 20 kVA mit einer Kommutierungsleistung von 40 kVA, die beim Anlauf der Hilfsmotoren benötigt wird.

Der Umrichter arbeitet mit einem Gleichstromzwischenkreis, er besteht deshalb aus einem Gleichrichterteil und einem Wechselrichterteil. Die 110-V-Fahrzeugbatterie, eine 52zellige Bleibatterie mit einer Kapazität von 70 Ah, dient zur Pufferung des Gleichstromzwischenkreises. Der Leistungsteil des Gleichrichtergerätes besteht aus einer halbgesteuerten Thyristorbrücke. Eine Spannungsregelung sorgt dafür, daß bei einer Schwankung der Speisespannung 200 V $16\frac{2}{3}$ Hz um + 15 bis - 30% die Ausgangsgleichspannung von 119 V über den ganzen Lastbereich mit einer Genauigkeit von \pm 1% eingehalten wird. Eine Stromregelung begrenzt den maximalen Ausgangsgleichstrom auf 240 A. Eine weitgehende Glättung des abgegebenen welligen Gleichstromes erfolgt durch eine Glättungsdrossel und die in Pufferschaltung betriebene Batterie.

Aus dem Gleichstromzwischenkreis bezieht der Starkstromteil des Wechselrichters seine Energie. Er besteht aus drei gleichen, selbstgeführten Einphasenwechselrichtern in Mittelpunktschaltung. Jede der drei Einheiten arbeitet mit zwei Thyristoren und zwei Blindleistungsdioden mit entsprechender Beschaltung. Der Kommutierungskreis besteht aus MP-Kondensatoren, Kommutierungsdrossel und Transformator. Die einzelnen Wechselrichter geben eine rechteckförmige Ausgangswechselspannung ab. Um ein Dreiphasensystem zu erhalten, werden die Sekundärwicklungen der drei Transformatoren im Stern geschaltet. Eine Spannungsüberwachung schaltet den Wechselrichter ab, wenn die Batterieladung ausfällt, z. B. beim Ausschalten des Fahrzeughauptschalters.

10. Zusammenfassung

Im Hinblick auf die noch relativ neue Anwendung der Stromrichtertechnik und Leistungselektronik in elektrischen Triebfahrzeugen wurde die Fahr- und Bremssteuerung des Triebzuges 420 eingehend dargestellt, um gleichzeitig einen Überblick zu geben, welche Möglichkeiten diese Technik bietet. Neben der zu erwartenden Verringerung des Wartungsaufwandes ist besonders die stufenlose Steuerung hervorzuheben, die es gestattet, Zugkraft und Geschwindigkeit zu jeder Zeit den Erfordernissen des Betriebes anzupassen und zu regeln. Damit ist die Voraussetzung geschaffen, den Fahrtablauf teilweise und später vielleicht einmal vollständig zu automatisieren.



ALLGEMEINE ELEKTRICITÄTS-GESELLSCHAFT AEG-TELEFUNKEN