

Elektrotechnische Zeitschrift

(Zentralblatt für Elektrotechnik)

Organ des Elektrotechnischen Vereins seit 1880 und des Verbandes Deutscher Elektrotechniker seit 1894

Schriftleitung: E. C. Zehme, Dr. F. Meißner, Dipl.-Ing. W. Kraska — Im Buchhandel durch Julius Springer, Berlin W 9

53. Jahrgang

Berlin, 24. März 1932

Heft 12

Elektrische Eilgüterzug-Lokomotive Bo - Bo.

Von Dipl.-Ing. W. Genschow, Berlin.

Übersicht. Die 1 BB 1-Lokomotiven der Reichsbahn wurden vor fast 10 Jahren entwickelt. Die Aufgaben dieser Lokomotiven zu übernehmen ist eine neue Lokomotive bestimmt, die durch zahlreiche Neuerungen am Fahrzeug- und elektrischen Teil besonders bemerkenswert ist. Nach allgemeinen Angaben werden die Neuerungen an den einzelnen Ausrüstungsteilen geschildert und dabei auch auf die dadurch erzielten Vorteile und die Herabsetzung des Gewichtes je Leistungseinheit eingegangen. Die Betriebserfahrungen werden kurz gestreift.

Die Deutsche Reichsbahn besitzt für den Güterzug- und Personenzugdienst auf den elektrisch betriebenen Strecken Mitteldeutschlands und Bayerns eine größere Anzahl leichter Güterzuglokomotiven mit vier Treibachsen, die als 1 B + B 1- und 1 BB 1-Lokomotiven gebaut sind. Die Lokomotiven der letzteren Achsfolge¹ entstammen Nachbestellungen; sie unterscheiden sich nur durch eine andere Ausbildung des Fahrzeugteils — Verwendung eines durchgehenden Rahmens mit durchlaufendem Kastenaufbau an Stelle von zwei Fahrgestellen mit dazwischen angeordneter Brücke — und eine andere Steuerung — Nockenschützensteuerung mit Feinregler an Stelle elektropneumatischer Schützen — von den 1 B + B 1-Lokomotiven², die 1922 entworfen wurden und somit den Fortschritten, die Maschinenbau und Elektrotechnik in den letzten Jahren erreichten, sowie den neueren Erkenntnissen auf dem Gebiet des Elektrolokomotivbaus nicht entsprechen können. Diesen Fortschritten und Erkenntnissen sollte mit dem Entwurf einer neuen, von den Bergmann-Elektrizitäts-Werken im Einvernehmen mit dem Reichsbahn-Zentralamt entwickelten Lokomotive Rechnung getragen werden, die sämtliche Aufgaben der alten Lokomotive übernehmen, darüber hinaus aber die gleichen Zuggewichte schneller (mit mindestens 75 statt 65 km/h) fahren sollte. Fernerhin war Vielfachsteuerung vorzusehen, um gegebenenfalls unter Kupplung von zwei Lokomotiven die größten auf Bergstrecken (Schlesien) vorkommenden Zuggewichte von 1400 t befördern zu können; dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die bisher für diesen Dienst verwendete 1 Co + Co 1-Lokomotive³, die bei den häufig vorkommenden geringeren Zuggewichten schlecht ausgenutzt ist, je nach den Zuggewichten durch eine oder zwei der neuen Lokomotiven zu ersetzen. Für Betrieb und Instandhaltung bedeutet dieser Ersatz mehrerer Bauarten durch eine einzige einen großen Fortschritt.

Da die neue Lokomotive, deren Höchstgeschwindigkeit auf 80 km/h festgesetzt wurde, mindestens die gleichen Zugkräfte wie die 1 BB 1-Lokomotive, aber höhere Geschwindigkeit entwickeln soll, mußte auch die Motorleistung entsprechend größer sein. Ihr Dienstgewicht blieb jedoch, da keine Laufachsen vorgesehen werden sollten, auf 80 t beschränkt, es war also gegenüber der alten Lokomotive um rd. 25 % zu verringern. Diese Aufgabe wurde durch Ausführung der Lokomotive mit der Achsfolge Bo-Bo mit Tatzlagermotoren sowie durch Anwendung neuerzeitlicher Bauverfahren erreicht, z. B. durch weitgehende Verwendung geschweißter an Stelle genieteter und gegossener Bauteile beim Fahrzeug- und beim elektrischen Teil. Einen guten Vergleich zwischen der 1 BB 1- und der Bo-Bo-Lokomotive, deren Herstellungspreis übrigens um 15 % niedriger ist, gibt die nachfolgende Gegenüberstellung.

	1 BB 1		Bo-Bo	
	1922	1930	1930	1930
Achsfolge	1 BB 1		Bo-Bo	
Entwurfjahr	1922		1930	
Erwärmungsvorschrift	alte Reichsbahnnorm. REB od. JEC			
Stundenleistung	2 200	3 000	3 800	4 200 PS
bei Geschwindigkeit	40	50	50	58 km/h
Stundenzugkraft	14 000	15 500	19 600	19 600 kg
Höchstgeschwindigkeit	65		80	km/h
Länge über Puffer	15 380		13 500	mm
Dienstgewicht	106		80	t
Gewicht des Fahrzeugteils	51,5		40	t
Gewicht des elektr. Teils	54,5		40	t
Einheitsgewicht der Lok.	52,7	26,7	21,1	19,1 kg/PS
Einheitsgewicht des elektrischen Teils	23,4	13,3	10,5	9,5 kg/PS

Die Verwendung von Tatzlagermotoren bei der Geschwindigkeit von 80 km/h erschien unbedenklich mit Rücksicht auf die Erfahrungen, die neuerdings die Reichsbahn sowie in noch viel größerem Umfang ausländische Bahnverwaltungen mit dieser Antriebsform bei hohen Geschwindigkeiten gesammelt haben. Hinsichtlich einer noch weiteren Steigerung der Geschwindigkeit, wie sie bei der Bo-Bo-Lokomotive auf Grund der bisherigen Betriebserfahrungen möglich sein wird (bis über 90 km/h), bestehen somit in dieser Richtung keine Bedenken. Nicht unumstritten dagegen ist die Frage, ob eine solche Geschwindigkeitsteigerung mit Rücksicht auf die Lauffähigkeit der laufachslosen Lokomotive und auch die Beanspruchung des Oberbaus angängig sein wird; jedoch ist auch diese Frage im Hinblick auf die Erfahrungen des Auslands zu bejahen.

Der Fahrzeugteil der Lokomotive wurde im Auftrag der Bergmann-Werke von der Berliner Maschinenbau-A.-G., vorm. L. Schwartzkopff geliefert (Abb. 1). Die vier Treibachsen sind paarweise in zwei Drehgestellen von 3300 mm Achsstand (Treibraddmr. 1250 mm) angeordnet; auf den beiden Drehgestellen ruht mit 5750 mm Drehzapfenabstand der Oberrahmen mit Kastenaufbau, in dessen Mitte der Transformator, ferner die Steuerungseinrichtung und an jedem Ende ein Führerstand angeordnet sind. In kurzen Vorbauten stehen auf der einen Seite die Motorluftpumpe, auf der anderen der Lichtumformer mit seiner Batterie.

Eine wesentliche Gewichtersparnis ist beim Fahrzeugteil dadurch erzielt worden, daß der Oberrahmen geschweißt wurde (Mindergewicht gegenüber Nieten rd. 1700 kg). Auch beim Kastenaufbau und bei den Gestellen für die elektrischen Apparate hat man weitgehend von der elektrischen Schweißung Gebrauch gemacht. Eine weitere Gewichtersparnis ist durch Verwendung von Leichtmetall (z. B. für die sehr großen Sandkästen) erzielt worden. Bei den Drehgestellen ergab das Schweißen kaum Vorteile; es hätte im Gegenteil die Instandhaltung bedeutend erschwert, wenn man z. B. die Pufferbohlen geschweißt hätte, die ja erfahrungsgemäß bei schwerem Güterzugdienst gelegentlich verbogen werden und ausgewechselt werden müssen. Man hat daher bei den Drehgestellen, in denen die Achsen in Pendelrollenlagern laufen, auf Schweißverbindungen verzichtet. Die Drehgestelle haben keine Verbindung zur Kraftübertragung. Die Zugkräfte laufen also durch den Oberrahmen. Nur die schweren Stöße werden durch Stoßpuffer aufgefangen; hierzu haben die Drehzapfen eine geringe Längsverschiebbarkeit erhalten. Ferner sind die Drehgestelle noch durch eine Diagonalstange ver-

¹ Elektr. Bahnen Bd. 6, S. 305 (1930).

² Elektr. Bahnen Bd. 1, S. 414 (1925).

³ Elektr. Bahnen Bd. 5, Erg.-H., S. 4 (1929).

bunden, um beim Bremsen auf bogenreichem Gefälle das Scharflaufen der inneren Spurkränze zu vermindern.

Als Besonderheit des Fahrzeugteils ist schließlich noch die Anordnung eines Achslastausgleichers zu erwähnen. Bei schwerer Anfahrt entlasten sich bekanntlich

ausgleicher wird dieser Achsentlastung entgegengewirkt und die Höchstzugkraft entsprechend gesteigert (bei Meßfahrten mit der Lokomotive von 80 t wurde auf einer Steigung von 10‰ eine Zugkraft bis 27 t am Zughaken gemessen). Der Achslastausgleicher arbeitet folgendermaßen: Das Gewicht des Oberrahmens wird auf jedes Drehgestell durch vier Federn übertragen, die gerade über den Achsen liegen. Die Federtöpfe sind als Druckluftzylinder ausgebildet. Beaufschlagt man die beiden über einer vorlaufenden Drehgestellachse befindlichen Zylinder, so übernehmen sie einen größeren Teil des Oberrahmengewichtes als die anderen; die beiden vorlaufenden Achsen werden etwa ebenso stark zusätzlich belastet, wie sie durch die Zughakenkraft entlastet werden. Gesteuert werden die Achslastausgleicher durch einen Hahn im Führerstand, bei dessen Bedienung die der Stellung des Fahrtwenders entsprechenden Zylinder beaufschlagt werden.

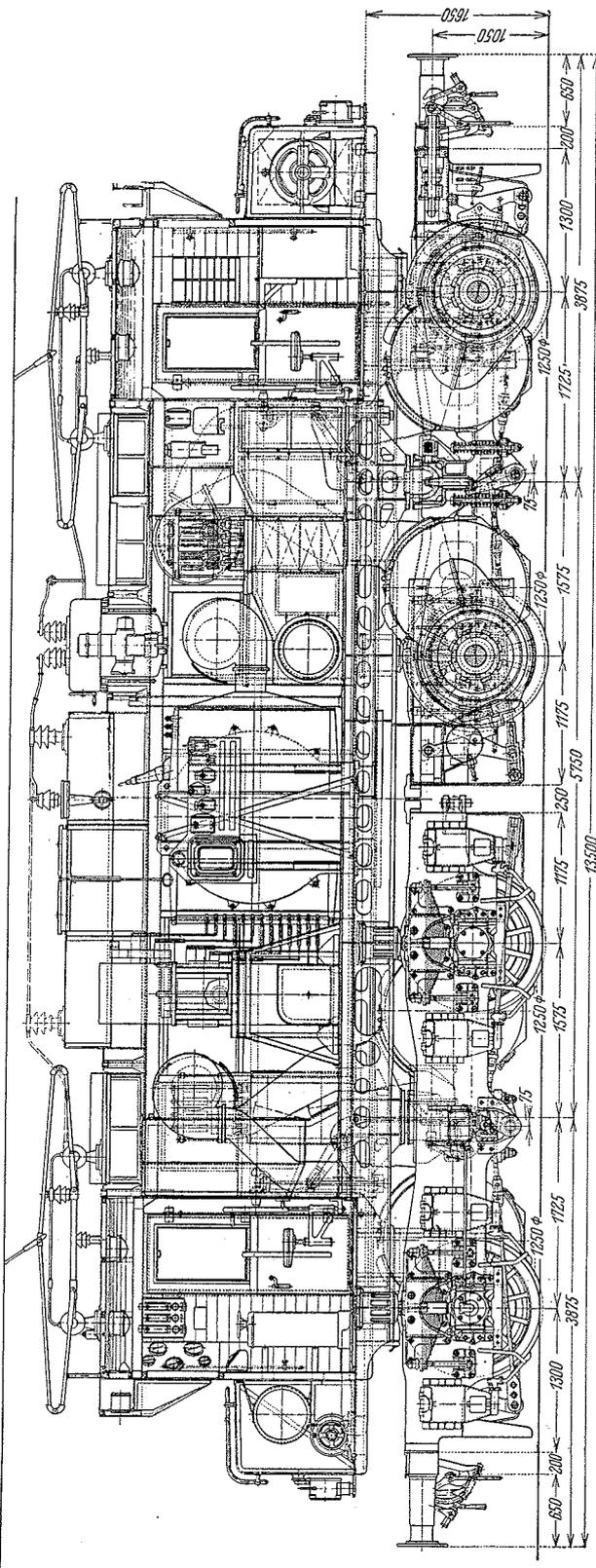


Abb. 1. Zusammenstellung (Längsschnitt).

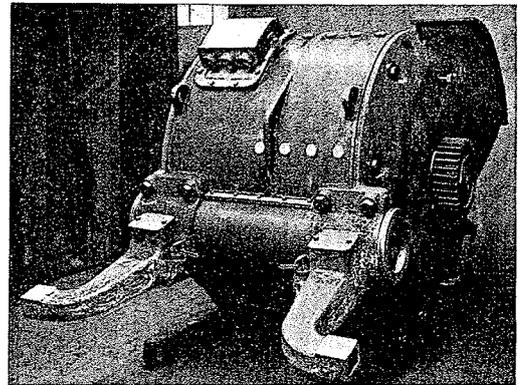


Abb. 2. Fahrmotor.

Die Fahrmotoren (Abb. 2) weisen zahlreiche bemerkenswerte Neuerungen auf. Schon die früheren Wechselstrom-Bahnmotoren von Bergmann wichen von der üblichen Bauart erheblich ab. Durch eine besondere Zusammenfassung von Erreger-, Kompensations- und Wendepolwicklung wurden rd. 30 % an Ständerkupfer gespart. Zum Fahrtrichtungswechsel wurden diese Motoren nicht umgeschaltet, sondern die Bürsten wurden verschoben. Man kann statt dessen aber auch die Bürsten stehen lassen, wenn man die Ständerwicklung, wie es bei den Motoren der Bo-Bo-Lokomotive erstmals ausgeführt ist, so ausbildet, daß eine Drehung ihrer elektrischen Achse möglich ist. Hierbei kann der Ständer eine umlaufende Trommelwicklung erhalten; diese gewährleistet eine hohe mechanische Festigkeit der Wickelköpfe, die sich gegenseitig abstützen, alle Spulen und Nuten haben die gleiche Form und verteilen sich gleichmäßig auf den Umfang. Wärmenester, wie sie bei üblicher Bauart beim Wendepol auftreten, sind also vermieden, so daß die Durchschnittsbeanspruchung gesteigert werden kann.

Die elektrische Achse der Ständerwicklung wird dadurch verschoben, daß von einem Teil der Wicklung für jede Fahrtrichtung jeweils nur eine Hälfte unter Strom steht. Der Kupferaufwand ist zwar etwas größer als bei Motoren mit reiner Bürstenverschiebung, aber immer noch kleiner als bei Motoren üblicher Bauart mit drei Wicklungen im Ständer. Dieser Mehraufwand verschwindet jedoch gegenüber den großen Vorteilen, die durch die Trommelwicklung ermöglicht sind. Da es nicht notwendig ist, den stromlosen Wicklungsteil auch spannungslos zu machen, genügen zum Fahrtrichtungswechsel je Motor zwei anstatt der sonst erforderlichen vier Schützen. Für die ganze Lokomotive werden also acht Schützen gespart.

Verschiedene neuere Erkenntnisse von den inneren Vorgängen in Einphasen-Bahnmotoren konnten hier erstmals ausgenutzt werden. Der Erfolg ist äußerlich an der auffallenden Unterdrückung des Bürstenfeuers beim Anfahren zu erkennen, ohne daß hierzu irgendwelche besonderen Einrichtungen (Parallelwiderstände, Drosselspulen) erforderlich sind. Ferner ist das bekannte Rütteln beim Anlauf fast verschwunden, die Zugkraft also für den gleichen Strom höher als bei der üblichen Bauart. Der Motor erwärmt sich daher bei Anfahrt viel weniger, so daß die gerade im schweren Güterzug- und Verschiebedienst große Gefahr eines Motorschadens bei schwerer Anfahrt vermindert ist.

Gehäusekörper und Ankerstern sind erstmals bei Tatzlagermotoren elektrisch geschweißt; gering beanspruchte Teile sind aus Leichtmetall gefertigt. Fremdlüftung, An-

bei jeder Bo-Bo-Lokomotive die vorlaufenden Achsen beider Drehgestelle infolge der am Zughaken ausgeübten Kraft, sie neigen zum Schleudern und begrenzen damit die im Höchstfall erreichbare Zugkraft⁴. Durch den Achslast-

⁴ Elektr. Bahnen Bd. 6, S. 297 (1930).

kerrollenlager, doppelseitiges gefedertes Vorgelege sind, als heute für Motoren dieser Größe und Bauart selbstverständlich, vorgesehen.

Aus der nachfolgenden Gegenüberstellung ergibt sich am besten die wesentliche Gewichtersparnis gegenüber dem Motor der 1 BB 1-Lokomotive, der zwar infolge seiner besonderen Bauweise (mit Motorwanne, getrennter Erregerwicklung) besonders schwer ist, dafür aber eine größere Leistung hat und nicht so harten Stößen wie ein Tatzlagermotor ausgesetzt ist.

Fahrmotor	1 BB 1	Bo-Bo		
Erwärmungsvorschrift	alte Reichsbahnnorm. REB od. JEC			
Stundenleistung	1 100	750	950	1050 PS
bei Drehzahl	400	750	750	870 U/min
Dauerleistung	800	600	760	880 PS
Gewicht einschl. Vorgelege und Radkasten	17 500	5100 kg		
Einheitsgewicht	15,9	6,8	5,37	4,86 kg/PS

Der Transformator hat Trockenisolation erhalten, da Ölkühlung für Bahntransformatoren wohl endgültig als überholt anzusehen ist. Der Aufbau ist im wesentlichen der gleiche wie bei den älteren Lufttransformatoren der Bergmann-Werke, die sich ja bekanntlich stets für die Verwendung derartiger Transformatoren eingesetzt haben, nämlich Mantelbauart mit Scheibenspulen.

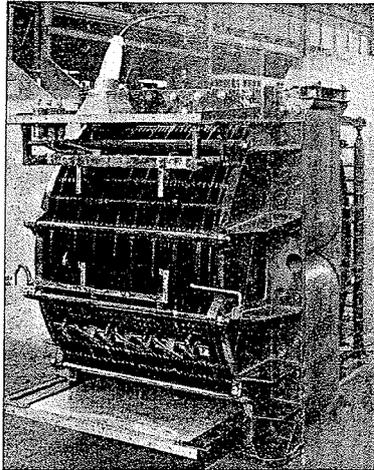


Abb. 3. Transformator.

Eine neue kreisrunde Spulenform (Abb. 3) ermöglichte jedoch eine vielsicherere Abstützung jeder einzelnen Windung und erleichterte die Kühlung. Schließlich ergab sie auch ein geringeres Gewicht der aktiven Teile. Eine weitere Gewichtersparnis ergab sich daraus, daß die Abstützungs- und Verkleidungsteile geschweißt sind. Der Transformator hat eine Nenndauerleistung von 2000 kVA + 250 kVA für Zugheizung; er wiegt 8300 kg. Der Öltransformator der 1 BB 1-Lokomotive

wiegt bei 1500 kVA Nenndauerleistung 11 700 kg; sein Einheitsgewicht von 7,8 kg/kVA ist also mehr als doppelt so hoch als bei dem neuen Transformator mit 3,7 kg/kVA.

Eine weitere bemerkenswerte Neuerung der Bo-Bo-Lokomotive ist die Steuerung. Die bei der 1 BB 1-Lokomotive verwendete Nockenschützensteuerung mit Feinregler hat sich zwar im allgemeinen bewährt, forderte aber infolge ihres mechanischen Antriebs vom Führer eine gewisse körperliche Anstrengung, die im Verschiebedienst mitunter schon unangenehm empfunden wurde und mit größerer Lokomotivleistung noch steigen mußte. Auch war die Steuerung für Vielfachbetrieb nicht geeignet. Gegen die Verwendung einer Schützensteuerung sprach einmal die große Anzahl von Schützen, die zwecks möglichst stetiger Zugkraftänderung bei langen, schweren Zügen nötig wäre, ferner die große Anzahl von Steuerleitungen und die als Fehlerquelle bekannten Verriegelungen. Bei der Bo-Bo-Lokomotive hat man daher die Feinreglersteuerung grundsätzlich beibehalten; sie wird jedoch nicht mehr mechanisch von Hand, sondern mit einem elektrisch gesteuerten Luftmotor (Abb. 4) angetrieben, der vom Führer nur eine ganz geringe Betätigungsarbeit erfordert und andererseits nur wenige Steuerleitungen und gar keine Verriegelungen benötigt. Dabei ist der wichtigste Vorteil der Feinreglersteuerung, nämlich der vom Führer beliebig einstellbare, langsame oder schnelle allmähliche Übergang der Zugkraft zwischen zwei Fahrstufen gewahrt; der Antriebsmotor und somit auch die Schaltwalze drehen sich genau synchron mit dem Fahrschalter. Dieser synchrone Lauf hätte sich mit rein elektrischem Antrieb, wie er an sich vielleicht näher gelegen hätte, mit einem gewöhnlichen Motor nur durch eine große Anzahl von Relais und Verriegelungen erzielen lassen. Ein Elektromotor in Sonderbauart würde freilich auch ohne Relais synchronen Lauf ergeben; man könnte ihm z. B. gleich einem Synchronmotor

eine beliebige Anzahl von Polen geben, die der Reihe nach durch den Fahrschalter ein- und ausgeschaltet werden. Hierbei wäre der Motor jedoch recht groß und schwer geworden, da er auch bei niedriger Fahrdrahtspannung noch das volle Drehmoment abgeben müßte; auch wäre der Steuerstrom unbequem hoch.

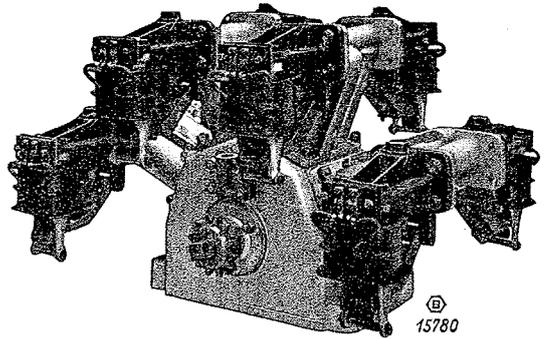


Abb. 4. Luftmotor zum Steuerungsantrieb.

Der Luftmotor ist gewissermaßen einem solchen Synchronmotor nachgebildet. Er hat 8 Zylinder, von denen beim Schalten immer vier aufeinanderfolgende über Magnetventile, deren je eins einem jeden Zylinder zugeordnet ist, beaufschlagt werden. Je 4 Zylinder greifen an einer Kurbel der Luftmotorwelle an, die sich also stets in einer ganz bestimmten Stellung einstellt und dabei mit einem Kettenzug die Nockenwelle und den Feinregler mitnimmt. Beim Übergang von einer Fahrstufe auf die nächste werden sämtliche 8 Magnetventile nacheinander durch Drehen eines kleinen Fahrschalters beaufschlagt. Die Welle des Luftmotors führt hierbei eine volle Umdrehung aus. Unabhängig von der Anzahl der Fahrstufen sind also auch nur acht durchgehende Steuerleitungen erforderlich. Der Ausfall einzelner Zylinder kann die Arbeitsweise der Steuerung nicht beeinflussen.

Das Gehäuse des Luftmotors ist aus Leichtmetallguß, seine Kolben sind die gleichen wie bei einer bekannten Kraftwagenmarke, für die überall billig Ersatz zu schaffen ist.

Der bisher verwendete Feinregler⁵ ist durch einen neuen ersetzt (Abb. 5). Auch er ist seinem Wesen nach ein Stufentransformator, dessen Anzapfungen zu einem kommutatorartigen Körper vereint sind, auf dem Kohlebürsten schleifen. Während aber beim alten Feinregler für den Übergang von einer Fahrstufe zur anderen die Bürsten nur einmal den ganzen Regelungsweg zurücklegen, machen sie ihn beim neuen Feinregler zweimal. In der Mitte zwischen beiden Wegen schaltet sich der neue

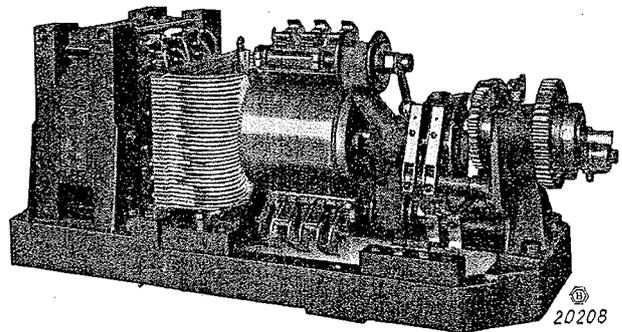


Abb. 5. Feinregler.

Feinregler selbsttätig um. Der hierzu benutzte fest angebaute Schalter wird rein mechanisch betätigt und schaltet in unbelastetem Zustand, also funkenfrei. Der neue Feinregler braucht elektrisch nur die halbe Leistung zu besitzen wie der alte; er ist also viel leichter und kleiner als der alte (236 statt 343 kg, 960 · 400 · 400 mm statt 1000 · 600 · 550 mm).

Ferner hatte der alte Feinregler noch den Nachteil, daß die hochbelasteten Widerstandsverbinder zum Durchbrennen oder Auslöten neigten, wenn der Führer zu langsam schaltete. Er gestattete es also nicht, gerade den Hauptvorteil der Feinreglersteuerung, den beliebig langsamen Übergang zur nächsten Fahrstufe, voll auszunutzen. Hier fand man eine ganz einfache Lösung, die sich auch bei

⁵ Elektr. Bahnen Bd. 1, S. 24 (1925).

Feinreglern alter Bauart anwenden ließe: Die Feinreglerwicklung besteht nicht aus einer, sondern aus drei Spulen, so daß immer Steg 1, 4, 7 usw. mit der ersten, 2, 5, 8 usw. mit der zweiten und 3, 6, 9 usw. mit der dritten Spule verbunden sind. Da die Kohlen zu schmal sind, um jemals mehr als drei Stege zu decken, fließt der Kurzschlußstrom zwischen benachbarten Stegen nicht durch eine einzige Windung, sondern durch die ganzen Spulen; schon dadurch wird er erheblich gedämpft. Gibt man aber den Verbindungen zwischen den Spulenenden etwas Widerstand, so arbeiten sie genau wie die Widerstandsverbinder; man braucht also nicht mehr ebensoviel Widerstandsverbinder wie Kommutatorstege, sondern im ganzen nur noch 6 (schon 4 genügen). Diese kann man nun sehr reichlich bemessen. Es sind einfache kurze Runddrahtspiralen, die ganz leicht ausgewechselt werden können und das Vielfache der Wärmeleistung eines alten Widerstandsverbinders besitzen. Damit ist die bisher schwächste Stelle des alten Feinreglers beseitigt; es kann jetzt viel langsamer als bisher ohne Gefahr geschaltet werden, d. h. man darf bei schwerer Anfahrt die Zugkraft der Maschine ganz langsam bis unmittelbar an die Schleudergrenze steigern, ohne daß infolge zu schnellen Schaltens eine Zugzerreißen oder vorzeitiges Schleudern der Treibachsen zu befürchten ist.

Die Fahrmotoren sind alle vier parallel geschaltet. Jeder Motor hat zwei elektro-pneumatisch arbeitende Fahrtwenderschütze, die auch als Trennschütze dienen. Die vier zu den Motoren eines Drehgestells gehörigen Schütze sind baulich miteinander vereinigt.

Der Transformator und die beiden Motoren eines jeden Drehgestells werden durch je einen Lüftersatz gekühlt. Die Kühlluft tritt vom Dach des Maschinenraumes in geräumige Kammern, wo sich Staub, Regen oder Schnee absetzen. Von dort gelangt sie in die Gebläse, die so stets mit verhältnismäßig reiner Luft versorgt sind. Von den Motoren tritt die Abluft nach außen, vom Transformator in den Maschinenraum; dort herrscht also stets ein kleiner Überdruck, der sich sofort erhöht, wenn die Fenster bei schlechtem Wetter geschlossen werden. In-

folge des Überdrucks kann bei dieser neuartigen Lüftung im Gegensatz zu anderen Anordnungen kein Regen und Schnee in den Maschinenraum gesaugt werden. Übrigens hat man auch bei den Lüftermotoren weitgehend von dem Schweißverfahren Gebrauch gemacht.

Die Motorluftpumpe der Reichsbahn-Einheitsbauart hat sich gut bewährt, ist aber inzwischen doch als veraltet anzusehen. Im Verein mit der Knorr-Bremse AG. ist daher von den Bergmann-Werken eine neue, erheblich leichtere und kleinere Pumpe entworfen worden, die bei gleicher Leistung von 20 PS nur noch 765 kg (Motor allein 315 kg) statt 1050 kg (Motor allein 505 kg) wiegt. Bei 40 mm geringerer Breite und 55 mm geringerer Höhe ist die neue Pumpe nur noch 1250 statt 1585 mm lang.

Bei den zahlreichen Neuerungen sowohl am Fahrzeugteil als auch am elektrischen Teil (Schweißung des Rahmens, Achslast-Ausgleicher, Motor, Transformator, Steuerung, Feinregler, Motorluftpumpe, Kühlung) durfte man auf die Betriebserfahrungen mit der neuen Lokomotive sehr gespannt sein. In regelmäßigem Betrieb seit Januar v. J. haben sich keinerlei Anstände an irgendeinem Ausrüstungsteil ergeben; die Maschine hat vielmehr voll befriedigend gearbeitet. Im Mai wurde sie eingehenden Meßfahrten unterzogen, u. zw. auf den schlesischen Strecken. Auf der Strecke Breslau-Königszell bei einer maximalen Steigung von 8,9‰ wurde ein Güterzug von 1850 t gefahren. Selbst häufige Anfahrten führten hierbei zu keinerlei unzulässigen Temperaturen. Auf der kurvenreichen Strecke Königszell-Dittersbach (Steigung maximal 20‰) wurden bei häufigen Anfahrten auf Steigungen 576 t anstandslos befördert, ebenso auf der Strecke Dittersbach-Görlitz mit langen Steigungen von 10‰ ein Zug von 900 t. Bei besonderen Anfahrversuchen wurde mit einem Zug von 1076 t in Steigungen von 10‰ (ohne Krümmung) anstandslos angefahren. Diese Zahlen zeigen die Leistungsfähigkeit der neuen Lokomotive; sie zeigen ferner, daß man bei der Durchbildung der Ausrüstungsteile keineswegs zur Erzielung möglichst niedriger Gewichte zu dicht an die gebotenen Grenzen herangegangen ist.

Leistungsmesser und mehrwelliger Wechselstrom.

Von G. Rasch, Heidelberg.

Übersicht. Verschiedene bekannte Schaltungen von Leistungsmessern, die bei einwelligem Wechselstrom richtige Ergebnisse liefern, werden auf ihr Verhalten bei mehrwelligem Strom untersucht. In der Regel zeigen sie dabei zu wenig an.

1. Grundlagen.

Auf die Spannungsspule eines Leistungsmessers wirke eine Spannung, deren v -te Oberwelle

$$u = f U_v \sqrt{2} \sin(v\alpha + v\beta) \quad (1)$$

ist, während die Stromspule von einem Strom von der v -ten Oberwelle

$$i_x = I_x \sqrt{2} \sin(v\alpha + v\gamma - \varphi_x) \quad (2)$$

durchflossen ist. Als Zeiger ist die Ordnungszahl v im folgenden weggelassen; alle Augenblicks- und Effektivwerte der Spannungen und Stromstärken, ferner die Phasenverschiebungen der letzteren gegen die ersteren beziehen sich also auf die v -te Oberwelle. Es bedeutet f einen von Fall zu Fall zu bestimmenden Zahlenwert, $\alpha = \omega t$ die Zeitfunktion gleich Winkelgeschwindigkeit der Grundwelle mal Zeit; β und γ sind für die drei Phasen R, S, T bzw. $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$. Die Spannungen sind Phasenspannungen, also zwischen je einer Klemme R, S, T und dem Sternpunkt O gemessen. Sie sind für alle drei Phasen gleich groß angenommen. Das deckt sich nicht ganz mit der Wirklichkeit, ist aber annehmbar, da große Unterschiede der Belastungen nur geringe Unterschiede der Spannungen bewirken.

Für die von dem Meßwerk angezeigte Leistung N gilt:

$$2\pi N = \int_0^{2\pi} f U_v \sqrt{2} \sin(v\alpha + v\beta) I_x \sqrt{2} \sin(v\alpha + v\gamma - \varphi_x) d\alpha$$

$$= f U I_x \int_0^{2\pi} [\cos(v\beta - v\gamma + \varphi_x) - \cos(2v\alpha + v\beta + v\gamma - \varphi_x)] d\alpha$$

$$N = f U I_x \cos(v\beta - v\gamma + \varphi_x). \quad (3)$$

Einige im folgenden häufiger gebrauchte Ausdrücke mögen schon hier entwickelt werden. Da v stets eine ganze Zahl bedeutet, also $\sin v \cdot 180^\circ = 0$ ist, folgt:

$$\left. \begin{aligned} \cos v \cdot 240^\circ &= \cos(v \cdot 180^\circ + v \cdot 60^\circ) = \cos v \cdot 180^\circ \cos v \cdot 60^\circ \\ \cos v \cdot 120^\circ &= \cos(v \cdot 180^\circ - v \cdot 60^\circ) = \cos v \cdot 180^\circ \cos v \cdot 60^\circ; \end{aligned} \right\} (4)$$

daher

$$\cos v \cdot 240^\circ = \cos v \cdot 120^\circ$$

$$\left. \begin{aligned} \sin v \cdot 240^\circ &= \sin(v \cdot 180^\circ + v \cdot 60^\circ) = \cos v \cdot 180^\circ \sin v \cdot 60^\circ \\ \sin v \cdot 120^\circ &= \sin(v \cdot 180^\circ - v \cdot 60^\circ) = -\cos v \cdot 180^\circ \sin v \cdot 60^\circ; \end{aligned} \right\} (5)$$

daher

$$\sin v \cdot 240^\circ = -\sin v \cdot 120^\circ.$$

Wenn kein Nulleiter vorhanden ist, gilt

$$I_R \sin(v\alpha - \varphi_R) + I_S \sin(v\alpha + v \cdot 120^\circ - \varphi_S) + I_T \sin(v\alpha + v \cdot 240^\circ - \varphi_T) = 0,$$

woraus sich ergibt:

$$\left. \begin{aligned} I_T \cos \varphi_T &= -I_R \cos(v \cdot 240^\circ + \varphi_R) - I_S \cos(v \cdot 120^\circ + \varphi_S) \\ I_T \sin \varphi_T &= -I_R \sin(v \cdot 240^\circ + \varphi_R) - I_S \sin(v \cdot 120^\circ + \varphi_S). \end{aligned} \right\} (6)$$

2. Aron-Schaltung.

Es sei nun zunächst gezeigt, daß die Aron-Schaltung zur Messung der Wirkleistung auch bei mehrwelligem Strom richtige Ergebnisse liefert.

In Abb. 1 und im folgenden sind die Stromspulen der Meßwerke waagrecht, die Spannungsspulen senkrecht gezeichnet. An den Klemmen der Spannungsspulen bezeichnen Buchstaben die Stellen des Stromkreises, mit denen sie verbunden zu denken sind. Die Übersichtlichkeit wird so besser als wenn man diese Verbindungsleitungen zeichnerisch darstellt. Am oberen Meßwerk liegt also die Spannungsspule an R und T . Die Spannung ist also, geometrisch ausgedrückt: $RT = RO - TO$, d. h. wir können uns die eine Spannungsspule ersetzt denken durch zwei differen-

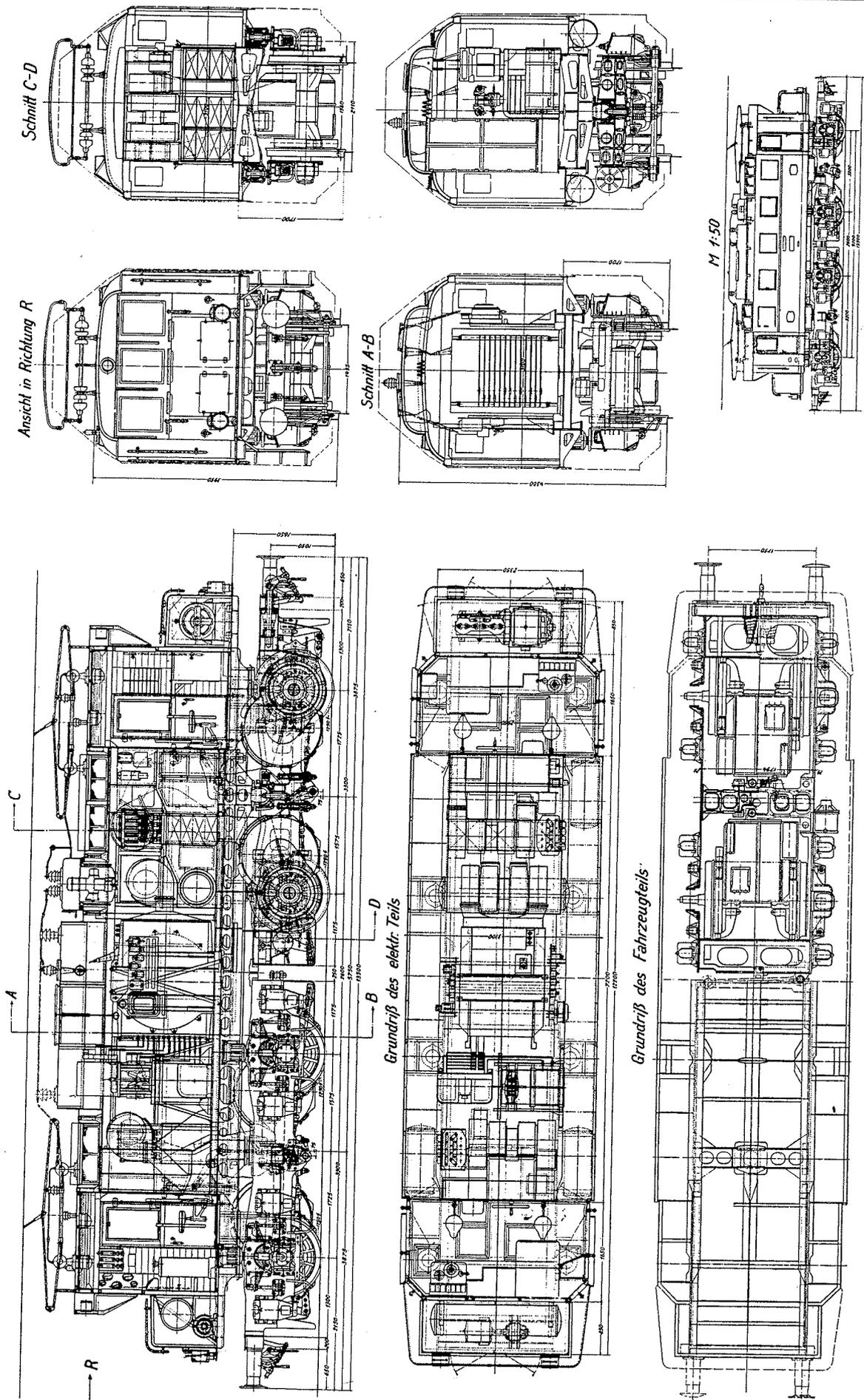


Bild 25.