

# HENSCHEL-BBC- DE 2500

**Eisenbahntechnische Rundschau:**

**DE 2500—Ein Wendepunkt  
in der Lokomotivtechnik**



Sonderdruck aus ETR, Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 11/1971



Friedhelm Bitterberg  
Werner Teich

# HENSCHEL-BBC-DE 2500

- Ein Wendepunkt in der Lokomotivtechnik -

DK 621.333.045.56:621.335.2  
(430.1 Henschel-BBC-DE 2500):625.282-83  
(430.1 Henschel-BBC-DE 2500)

Die Gründe für eine neue Lokomotivtechnik werden dargelegt. Am Beispiel einer Gemeinschaftsarbeit der Deutschen Industrie werden Vorteile, Einzelheiten und Leistungsübertragung der Lokomotive DE 2500 sowie ihr Verhalten bei Versuchsfahrten beschrieben.

The reasons for a new approach to locomotive design are set out. These are followed by a description of the DE 2500 locomotive, a joint effort by German manufacturers, its advantages and its behaviour on trial running.

Les auteurs exposent les raisons de cette évolution dans la technique. Partant de l'exemple d'une réalisation commune de l'industrie allemande, ils montrent les avantages offerts par la locomotive DE 2500, fournissent des détails sur sa construction et sa transmission, ainsi que les résultats obtenus durant des marches d'essai.

En este artículo se expone el porqué de llegar a una nueva concepción técnica en locomotoras. El ejemplo es la DE 2500, máquina diseñada en colaboración entre varias industrias alemanas. El autor describe sus ventajas, detalles, sistema de transmisión de fuerza y también su respuesta en los viajes de prueba.

Friedhelm Bitterberg

## Lokomotivtechnische Gesichtspunkte

### 1. Bewährung der hydraulischen Leistungsübertragung

Die deutsche Lokomotivindustrie hat sich mit der in zwei Jahrzehnten intensiv betriebenen Entwicklung von Diesellokomotiven mit hydraulischer Leistungsübertragung im In- und Ausland einen guten Namen gemacht. In Zusammenarbeit mit der Deutschen Bundesbahn (DB) und den Getriebefirmen entstanden ganze Baureihen (BR) mit Dieselmotorleistungen von 120 PS bis 5 400 PS und hydraulischer Leistungsübertragung. Durch immer weitergehende Ausnutzung aller technischen und technologischen Möglichkeiten einer hochentwickelten Industrie gelang es, Leistungsübertragungssysteme zu entwickeln, die in ihrem geringen Gewicht je übertragbare Leistungseinheit konkurrenzlos waren.

Die DB rüstete ihren gesamten Lokomotivpark mit leistungsstarken, aber relativ leichten Lokomotiven aus, die vierachsig mit größten Achslasten von 20 t bis zu 2 500 PS Dieselmotorleistung über ein hydraulisches Getriebe auf die Treibradsätze übertragen. Um die gleiche Leistung mit den bislang im Ausland in großen Stückzahlen verwendeten elektrischen Übertragungssystemen mit Gleichstromfahrmotoren auf die Schienen zu bringen, sind zur Einhaltung der zuvor genannten Achslasten mehr als vier Radsätze erforderlich.

Auch ausländische Bahnverwaltungen nutzten die Möglichkeiten des geringen Leistungsgewichtes der hydraulischen Leistungsübertragung. So konnte die deutsche Lokomotivindustrie, insbesondere Henschel-Rheinstahl Transporttechnik, eine Reihe von Lokomotivserien mit dieser Leistungsübertragung exportieren. Trotz die-

---

Dipl.-Ing. Friedhelm Bitterberg, Rheinstahl Transporttechnik,  
35 Kassel 2, Henschelstraße 2.

Obering. Werner Teich, Brown, Boveri & Cie. AG, 68 Mannheim 1, Postfach 351.

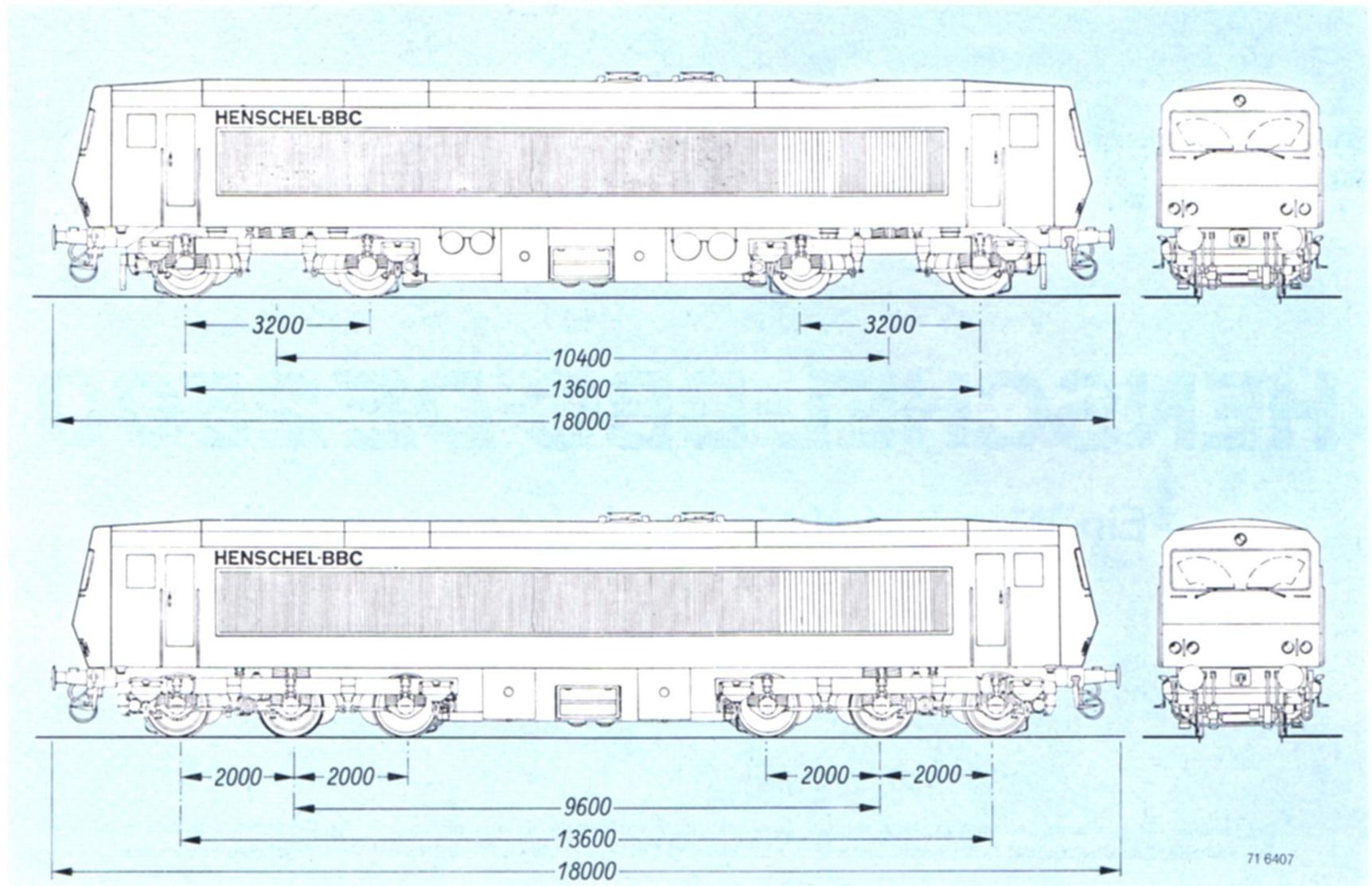


Bild 1: Hauptabmessungen der DE 250 bei zwei- und dreiachsigen Drehgestellen.

ser beachtlichen Erfolge blieb der Ausfuhr von dieselhydraulischen Lokomotiven ein entscheidender Durchbruch auf dem Weltmarkt verwehrt. Der Marktanteil erreichte nicht die 20 %-Grenze. Die Diesellokomotiven mit elektrischer Leistungsübertragung beherrschen nach wie vor den Markt. Selbst in unseren europäischen Nachbarländern geht bei Streckenlokomotiven die Entwicklung eindeutig in Richtung der elektrischen Leistungsübertragung.

## 2. Gründe für die elektrische Leistungsübertragung

Ein gewichtiger Grund für die Bevorzugung der elektrischen Leistungsübertragung ist ihr übersichtlicher Aufbau und die unempfindliche Ausführung der Bauteile. Die Generatoren, Schaltteile und Gleichstromfahrmotoren sind im Laufe der Jahre zu betriebssicheren Bestandteilen mit geringen Wartungsforderungen und langer Lebensdauer entwickelt worden. Eine regelmäßige Wartung ist nur bei den Kollektoren der Gleichstromfahrmotoren nötig, die auch beim Aufbringen hoher Zugkräfte im Stillstand der Lokomotive die kritische Stelle der elektrischen Leistungsübertragung bilden.

Bei der hydraulischen Leistungsübertragung geht der Leistungsfluß vom Dieselmotor zu den Treibradsätzen über hochwertige Maschinenteile, die an die Fertigung und Wartung entsprechende Ansprüche stellen. Es ist eine Vielzahl von schnelllaufenden Zahnrädern, Lagern, Schaltkupplungen, Kardanwellen mit Gelenken und von Schiebestücken notwendig, die nur bei entsprechender Pflege und ohne Mißhandlung durch unsachgemäße Bedienung der Lokomotive eine ausreichende Lebensdauer erreichen. Welche Laufleistungen dann dieselhydraulische

Hochleistungslokomotiven erreichen können, zeigt der Betrieb bei der DB.

Die jahrelangen Beobachtungen der Henschel-Auslandsingenieure haben jedoch ergeben, daß mit hydraulischen Lokomotiven nur bei den Bahnverwaltungen befriedigende Betriebsergebnisse erzielt werden, die sowohl beim Lokomotivpersonal als auch im Werkstätdienst eine ausreichende technische Leistungsstufe erreicht haben. Aber auch Bahnverwaltungen mit den notwendigen technischen Voraussetzungen sind in zunehmendem Maße bestrebt, das hochqualifizierte Lokomotiv- und Werkstättenpersonal zur Kostenminderung zu verringern. So konnten letzten Endes die hydraulischen Lokomotiven in den Vereinigten Staaten von Nordamerika nicht Fuß fassen, weil sie trotz der erreichten Betriebstüchtigkeit nicht in das übliche Unterhaltungsschema der amerikanischen Bahnen hineinpaßten. Die amerikanischen Lokomotiven mit elektrischer Leistungsübertragung sind im Laufe der Jahre auf einen geringen Wartungsaufwand gebracht worden. Die erreichte Betriebssicherheit dieser Lokomotiven ist so groß, daß es kaum zu Ausfällen im Betrieb kommt.

Die Firma Henschel-Rheinstahl Transporttechnik hat bisher als einzige deutsche Lokomotivfirma mit gleichem Nachdruck die Entwicklung und den Serienbau von Lokomotiven mit hydraulischer und elektrischer Leistungsübertragung betrieben. Erinnerung sei an die letzten Lieferungen dieselhydraulischer Lokomotiven nach Ceylon, Indien, Indonesien, Ostafrika und China mit Dieselmotorleistungen zwischen 1 100 PS und 5 400 PS je Lokomotive und an die Lokomotivserie mit elektrischer Leistungsübertragung für die Staatsminen in Holland.

Lokomotiven, die heute bei der Niederländischen Staatsbahn laufen. Weiter sei hingewiesen auf Serien für Ghana, für die Österreichischen Bundesbahnen (Reihe 2050), für Ägypten und Liberia, durchweg Lokomotiven mit General-Motors-Gleichstrom-Ausrüstung und Dieselmotorleistungen von 1 450 PS bis 2 000 PS.

Schon vor Jahren zeichnete sich ab, daß auf die Dauer ein ausreichender Anteil am Lokomotivweltmarkt nur mit einem Lokomotivangebot gesichert werden kann, das in der Übersichtlichkeit und Unempfindlichkeit der Lokomotiven mit den dieselektrischen Lokomotiven anderer Anbieter, im Hinblick auf das Leistungsgewicht aber mit den eigenen dieselhydraulischen Lokomotiven den Wettbewerb aufnehmen kann.

Auch der Bereich der BBC-Konzerne verfügt über umfangreiche Erfahrungen auf dem Gebiet der dieselektrischen Traktion. Hier sind die Lokomotivreihen 64 000, 68 000 und 66 000 der Französischen Staatsbahnen zu erwähnen. Die nach Rumänien gelieferte Bauart 060 DA (2 100 PS) wurde von der rumänischen Industrie in Lizenz gefertigt. Inzwischen wurden etwa 1 000 Lokomotiven dieser bewährten Bauart hergestellt. Erfahrungen liegen mit der klassischen Gleichstromübertragung, aber auch mit der Drehstrom-Gleichstromübertragung vor.

### 3. Entwicklung der neuen Lokomotivtechnik

Im Jahre 1965 stellten sich die Firmen Rheinstahl Transporttechnik und BBC die Aufgabe, eine neue Lokomotivtechnik zu entwickeln, die im wesentlichen folgende Kennzeichen haben sollte:

Achslasten ab 12,5 t, Spurweiten ab 1 000 mm, Universalantriebstechnik ohne Umschaltung oder Getriebevariationen, Dauerzugkraft in der Größenordnung der Anfahrzugkraft, Achsfolge BB oder CC, Aufbau nach einem Baukastengrundsatz, der die Verwendung von möglichst vielen Teilen bei unterschiedlichen Achsfolgen und unterschiedlichen Leistungsklassen zuläßt. Die Lokomotivtechnik muß zukunftsicher und wettbewerbsfähig sein.

Diese äußerst anspruchsvolle Aufgabenstellung erforderte einen entsprechenden Ablauf der Entwicklungsarbeiten bei beiden Firmen. Nach umfangreichen Voruntersuchungen fiel die Entscheidung, eine Lokomotive mit Drehstromfahrmotoren und einem neuen Laufwerk zu entwickeln. Um das finanzielle und technische Risiko in Grenzen zu halten, wurde die Entwicklung in Abschnitte unterteilt. Nach Abschluß jedes Entwicklungsabschnittes wurde eine wirtschaftliche und technische Bilanz aufgestellt. Nachdem diese Bilanzen jeweils ein Weiterführen der Arbeiten rechtfertigten, wurde der nächste Entwicklungsabschnitt begonnen. So blieb das jeweilige Risiko übersehbar. Das erste Ergebnis dieser Entwicklung mit der Typenbezeichnung DE 2 500 wird im folgenden beschrieben.

### 4. Gesamtentwurf der Lokomotive

Die Lokomotive ist so entworfen, daß sie sowohl mit zweiachsigen als auch mit dreiachsigen Drehgestellen geliefert werden kann. Ein Umsetzen des Lokomotivkastens von zweiachsigen auf dreiachsige Drehgestelle und umgekehrt ist ohne nennenswerte Änderungsarbeiten möglich. Bei zweiachsigen Drehgestellen wird eine größte Achslast von 20 t bei einem größten Kraftstoffvorrat

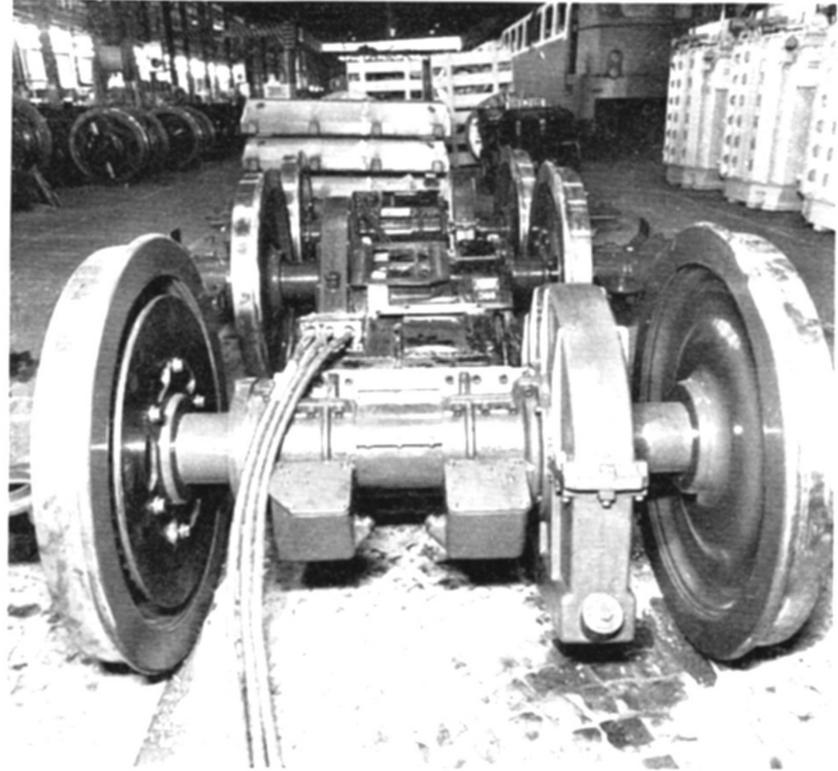


Bild 2: Treibachsen mit Asynchron-Fahrmotoren in Tatzlagerung.

von 4 t und eingebauter elektrischer Zugheizung für 400 kW Leistung nicht überschritten. Die Achslasten werden bei der Ausführung mit dreiachsigen Drehgestellen auf höchstens 14 t beschränkt.

Die Querschnittsmaße der Lokomotive sind so gewählt worden, daß sie sowohl auf allen normalspurigen Eisenbahnen als auch auf einem großen Teil der schmalspurigen afrikanischen, südamerikanischen und asiatischen Eisenbahnen fahren kann. Mit einer Scheitelhöhe des Lokomotivkastens von 3 800 mm ist sie etwa 450 mm niedriger als die entsprechenden DB-Lokomotiven der Bauartenfamilie 216; bei einer Gesamtlänge von 18 m über Puffer ist sie etwa 1,6 m länger als die in der Leistung vergleichbaren Lokomotiven der BR 218 der DB. Diese größere Länge ergibt sich einmal aus der Längenentwicklung der dreiachsigen Drehgestelle und des dazwischenliegenden Kraftstoffbehälters mit Batteriekasten und zum anderen durch den Verzicht auf ein Übereinandersetzen von Kühlaggregate und Teilen der Leistungsübertragung. Bei der BR 218 liegt bekanntlich die Kühleranlage über dem hydraulischen Getriebe.

Jeder Treibradsatz der zweiachsigen wie auch der dreiachsigen Ausführung (Bild 1) hat zum Antrieb einen Asynchron-Fahrmotor mit Tatzlagerung (Bild 2). Obwohl es sich entsprechend dieser Radsatz-Fahrmotorzuordnung um eine Lokomotive mit Einzelachsenantrieb und somit mit den Achsfolgen Bo'Bo' und Co'Co' handelt, wirkt sie wie eine Lokomotive der Achsfolge B'B' und C'C'. Bedingt durch die Vorgabe eines einheitlichen Drehfeldes für alle Fahrmotoren einer Lokomotive und durch die entsprechende Fahrmotorcharakteristik entsteht eine Kupplung der einzelnen Achsen auf der elektrischen Seite. Diese Kupplung über das gemeinsame Drehfeld bewirkt, daß keine Blindmomente zwischen den einzelnen Radsätzen entstehen, wie dies bei einer mechanischen Kupplung über Gelenkwellen auf Grund von geringfügigen Durchmesserunterschieden der Treibräder der Fall ist. Damit werden die wesentlichen Nachteile der mechanischen Kupplung mit Gelenkwellen vermieden. Wie schon wiederholt interessierten Fachleuten vorgeführt wurde, können bei der DE 2500 mehrere Radsätze auf ver-



Bild 3: DE 2500 auf einem Viadukt der hessischen Odenwaldbahn.

ölte Schienenstücke gefahren werden und fangen dann bei entsprechender Zugkraft an, stärker als die übrigen Treibräder zu schlüpfen. Die Drehzahlerhöhung der stärker schlüpfenden Räder ist äußerst gering und wird über die steile Momentenkennlinie der Fahrmotoren genau überwacht. Ein Schleudern der einzelnen Treibräder, wie es sonst beim Einzelachsenantrieb möglich ist, wird damit verhindert. Auf die hier wirksamen Zusammenhänge von Fahrmotorkennlinien und Steuerung der Fahrmotordrehfelder sowie auf die Maßnahmen zur Verhinderung des Schleuderns aller Radsätze einer Lokomotive wird in der Beschreibung des elektrischen Teils im einzelnen eingegangen.

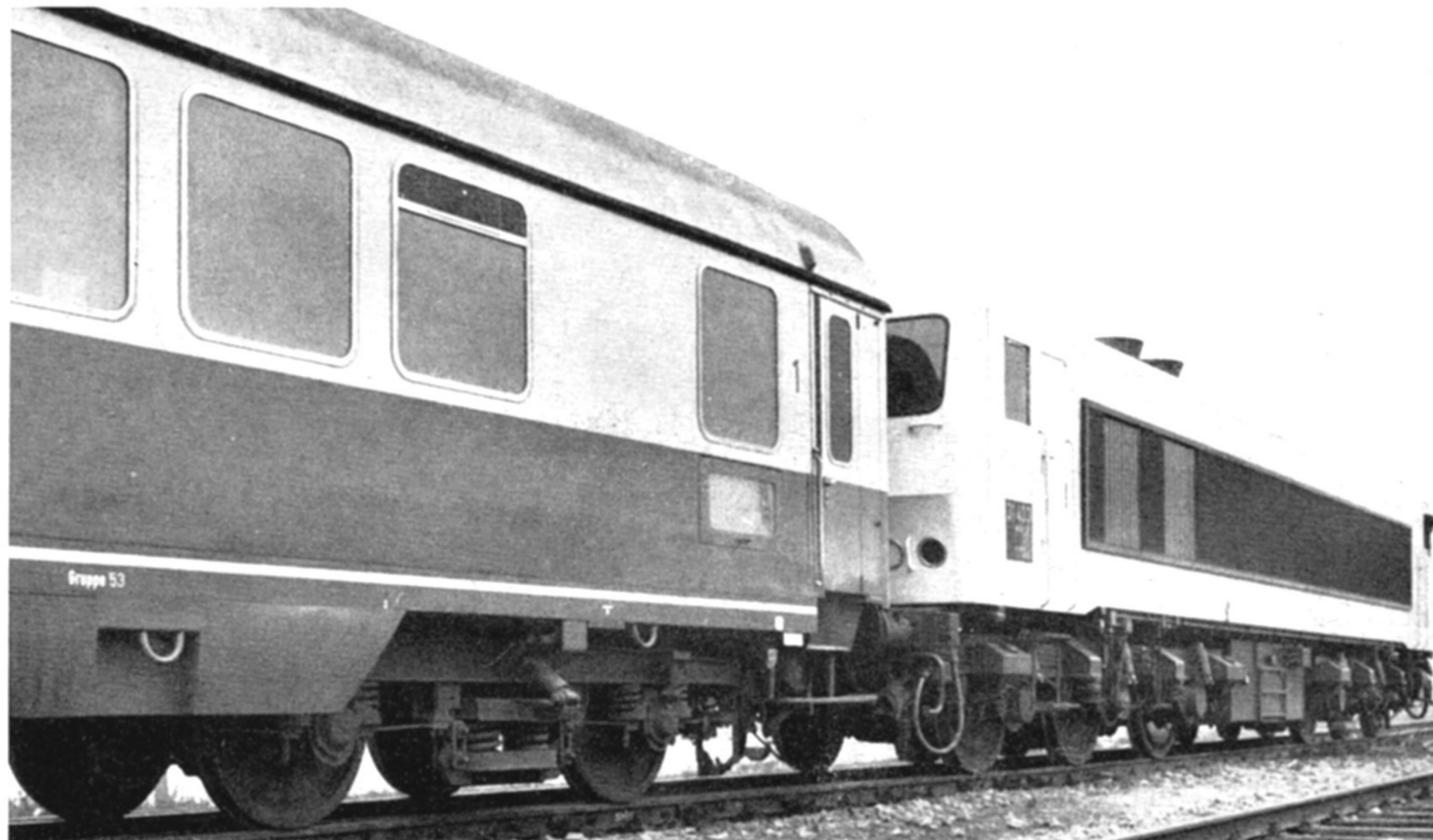
Wie schon dargelegt, sind die Umgrenzungsmaße des Lokomotivkastens auch für schmalspurige Eisenbahnen in afrikanischen und asiatischen Ländern vorgesehen. Es ist möglich, schmalspurige dreiaxelige Drehgestelle ohne jede Änderung am Lokomotivkasten unterzusetzen. Die Zug- und Stoßvorrichtung besteht aus einer abnehmbaren Pufferbohle, deren Träger unabhängig vom Kopfstück der Aufbauten erst im Bereich der Seitenfenster an eine quer durch den Lokomotivkasten angeordnete Strebe aus dickwandigem Blech angeschweißt wurde. Damit können schon beim Prototyp die Pufferträger vom Lokomotivkasten getrennt und durch eine andere Konstruktion für eine Mittelpufferkupplung entsprechend den Forderungen ausländischer Bahnen ersetzt werden. Da außerdem durch den Antrieb mit Asynchron-Fahrmotoren jeder Betriebspunkt der Lokomotive beliebig lang gefahren werden kann, ist ein uneingeschränkter Einsatz dieser Lokomotive sowohl im schweren Güterzugdienst als auch im Schnellzugdienst bis zu Geschwindigkeiten von 140 km/h und u. U. noch höher möglich. Zum ersten Mal ist es somit gelungen, eine deutsche Lokomotive für einen universellen Einsatz für die verschiedensten Zugarten, Spurweiten und Umgrenzungsmaße zu verwirklichen.

Der Prototyp der DE 2500 wurde inzwischen in einem umfangreichen Erprobungsprogramm geprüft. Im Bild 3 ist die allein fahrende Lokomotive auf einem Viadukt der Bahn von Weinheim a.d. Bergstraße in den Oden-

wald dargestellt. Bild 4 zeigt die Lokomotive vor einem aus Reisezugwagen bestehenden Zug für Geschwindigkeiten bis 140 km/h. Im Bild 5 steht die DE 2500 abfahrbereit im Bahnhof Unter Waldmichelbach (Odenwald) mit einem Güterzug von 204 t Gewicht und einer Dampflokomotive der BR 050. Auf der hinter dem Bahnhof anschließenden Rampe mit der Neigung 1 : 30 und Krümmungen von 200 m Halbmesser ist eine Zuglast von 204 t die obere Grenze für die BR 050 mit einem Reibungsgewicht von 75 t. Die DE 2500 förderte die leerlaufende Dampflokomotive und den Zug anstandslos die Steigung hinauf und fuhr auch auf der Steigung einwandfrei an. Für die eigentlichen Versuchsfahrten auf dieser Strecke wurde ein Güterzug aus beladenen Wagen mit einem Gesamtgewicht von 426 t verwendet.

Eine Anfahrt in einer Steigung 1 : 30 und mit der zuvor genannten Zuglast von 426 t stellt harte Anforderungen sowohl an das Laufwerk der Lokomotive als auch an den elektrischen Antrieb. Wenn die Bremsen des gesamten Zuges gelöst werden, so läuft dieser bei einem bestimmten Lösezustand der Bremsen talwärts ab. Es ist hierbei nicht mehr möglich, den Zug durch Aufschalten der Lokomotivleistung abzufangen. Bei der DE 2500 kann nun die volle Anfahrzugkraft beliebig lange auch bei stehender Lokomotive von den Fahrmotoren aufgebracht werden. Somit ist es möglich, die benötigte Zugkraft vor dem Lösen der Bremsen aufzuschalten. Sobald die Bremsen gelöst sind, zieht der Zug langsam bergauf an. Bei den Anfahrversuchen mit der DE 2500 konnte beobachtet werden, daß beim Überfahren absichtlich verölter Schienenstellen oder beim Einfahren in Krümmungen von 200 m Halbmesser dieser oder jener Radsatz das vom Fahrmotor aufgebrachte Moment nicht mehr voll auf die Schiene übertragen konnte. Durch kaum sichtbare Vergrößerung des Schlupfes wurde auf Grund der steilen Fahrmotorenkennlinien und der elektrischen Kupplung der Fahrmotoren untereinander sofort wieder ein Gleichgewicht hergestellt zwischen dem vom Fahrmotor aufgebrachten Moment und dem Moment, das bei den veränderten Reibungsverhältnissen vom Radsatz auf die Schiene aufgebracht werden konnte. Sobald der Reibwert zwischen Rad und Schiene wieder die übliche Größe

Bild 4: DE 2500 vor einem Reisezug.



erreicht hatte, ging auch der Schlupf zurück, und die ursprünglichen Verhältnisse wurden wieder hergestellt.

Die Kupplung der einzelnen Treibachsen verhindert jedoch nicht, daß bei zu hohen Zugkraftanforderungen an die Lokomotive alle Radsätze zum Schleudern kommen können. Dieses Schleudern aller Achsen wird durch eine ungewöhnlich starke Schlupfzunahme des Radsatzes mit den ungünstigsten Belastungs- und Reibungsverhältnissen eingeleitet. Eine genaue Drehzahlkontrolle der einzelnen Fahrmotoren registriert diese starke Schlupfzunahme und verringert die Leistungsvorgabe für alle Fahrmotoren kurzzeitig, so daß der Schlupf dieser Achse wieder auf das übliche Maß zurückgehen kann. So wird durch eine nur kurzzeitige und geringe Verminderung der Zugkraft ein Schleudern der gesamten Lokomotive bereits im ersten Ansatz unterbunden.

### 5. Anordnung der Maschinenanlage

Die Maschinenanlage der DE 2 500 besteht aus einer Reihe von Baugruppen, die außerhalb der Lokomotive vollständig zusammengesetzt und geprüft werden.

Der Dieselmotor, der Generator und der zentrale Kühlerlüfter für die Belüftung des Generators und der Fahrmotoren sind zu einer Einheit zusammengefaßt. Der Dieselmotor wurde von der M.A.N. unter der Typenbezeichnung V 6 V 23/23 TL für eine größte Leistung von 2 500 PS bei 1 500 U/min gebaut. Um den Motor in der Bauhöhe 300 mm niedriger als die Normalausführung zu halten, wurden die üblichen zwei M.A.N.-Abgasturbolader durch vier BBC-Abgasturbolader ersetzt. Der Dieselmotor ist durch einen Woodward-Regler drehzahlregelt. Über eine Tragkonstruktion am unteren Gehäuseteil des Dieselmotors und eine Zwischenglocke ist der Drehstromgenerator angeflanscht. Die Kurbelwelle des Dieselmotors wurde über eine Membrankupplung mit dem einlagerigen Läufer des Generators verbunden. Das Gehäuse des zentralen Kühlerlüfters ist wiederum an das Generatorgehäuse angeschraubt und das Lüfterrad auf das freie Wellenende des Generatorläufers aufgezogen. Dieser aus Dieselmotor, Generator und zentralem Lüfter

bestehende Block wird in die Lokomotive mit einer Hebevorrichtung eingesetzt.

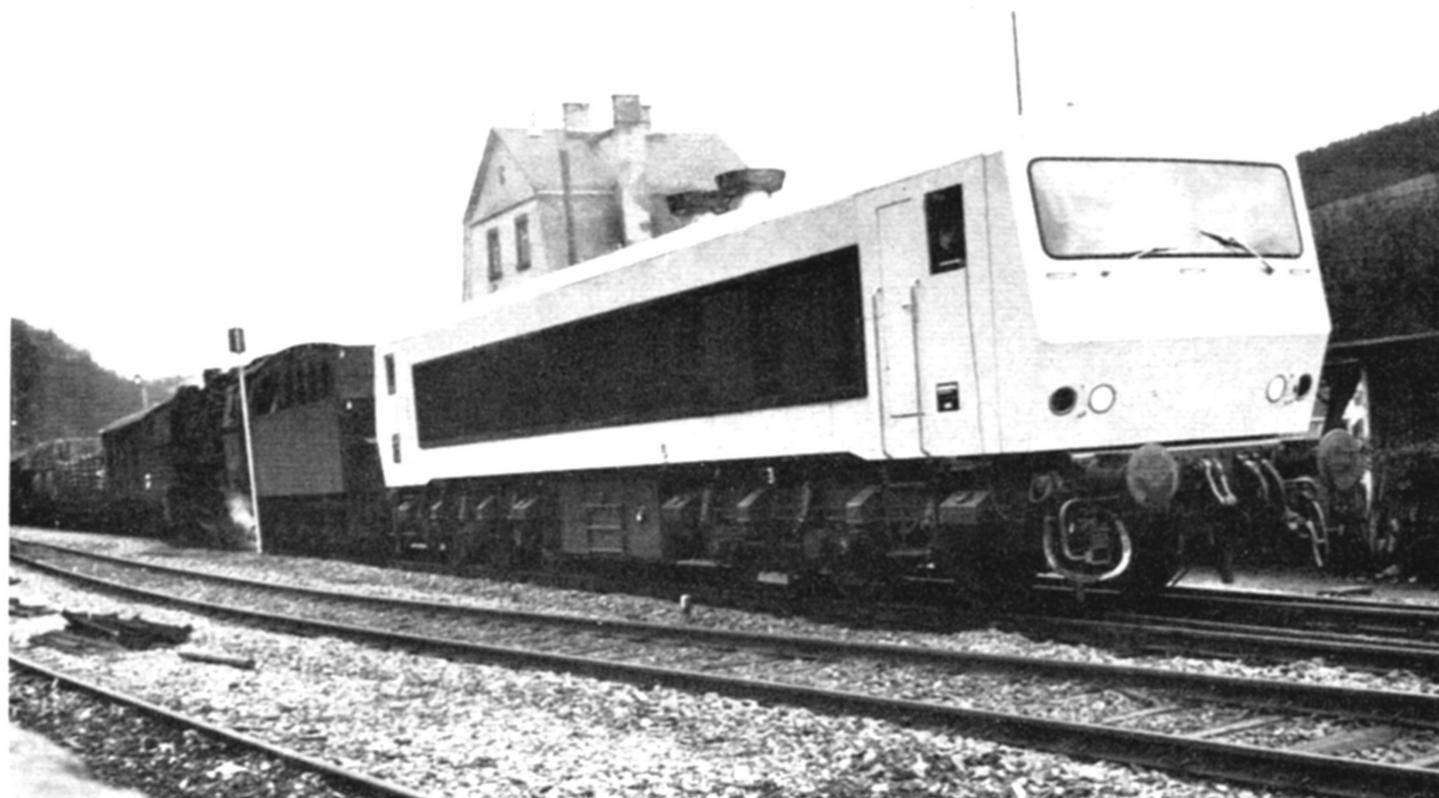
Alle für den Diesetriebetrieb notwendigen Hilfsbetriebe bilden mit dem Kühler eine Einheit. Diese umfaßt die Kühlerelemente, den Kühlerlüfter, eine Warmhalteeinrichtung für beide Kühlwasserkreisläufe, den Kühlwasserausgleichbehälter, die beiden Wärmetauscher zum Rückkühlen des Schmieröls und des Kolbenkühlöls, einen Schmierölfeinfilter, die Schmierölvorpumpe, eine Schmierölmwälzpumpe zur Arbeit während des Warmhaltens, eine Kraftstoff-Förderpumpe, den Kraftstoff-Filter und eine Reihe kleinerer Aggregate. Diese Diesel-Hilfsbetriebeeinheit wird ebenfalls außerhalb der Lokomotive fertig aufgebaut und geprüft. Vor dem Einsetzen dieser Einheit in die Lokomotive brauchen im Lokomotivkasten lediglich die Einfüllleitungen für das Kühlwasser sowie die Kraftstoffleitungen zum Kraftstoffbehälter verlegt zu sein. Nach dem Einsetzen sind nur noch die Verbindungen zum Dieselmotor, zum Kraftstoffbehälter und zu der Kühlwassereinfüllleitung herzustellen. Der Kühlerlüfter wird vom Dieselmotor über ein zentrales Getriebe mechanisch angetrieben.

Auf der Generatorseite des Diesel-Generator-Aggregates ist mechanisch eine Lichtanlaßmaschine (LAM) und daran wiederum mechanisch ein Luftpresse (LP) vom Typ VV 450/150 angeschlossen, so daß ein mechanisch gekuppelter Strang vom Kühlerlüfter über das Dieselaggregat bis zum Kompressor vorhanden ist.

Das dritte große Aggregat der Maschinenanlage ist der sich an den Luftpresse anschließende Umrichter-schrank für die Traktion. Im Mittelteil dieses Schrankes ist der Widerstand für die elektrische Bremse untergebracht. Für Prüfläufe des Dieselmotors kann die vom Generator erzeugte elektrische Energie in diesem Bremswiderstand in Wärme umgewandelt werden.

Setzt man diese Hauptaggregate auf einem Rahmen außerhalb der Lokomotive zusammen und fügt einige Regeleinrichtungen und einen Kraftstoffbehälter hinzu, so ist ein Prüfstand für die gesamten Diesel-Hilfsbetriebe, den Dieselmotor, den Generator und den Gleichstromzwischenkreis der elektrischen Leistungsübertragung

Bild 5: DE 2500 vor einem Güterzug und leerlaufender Dampflokomotive BR 050.



vorhanden. Die Möglichkeit, sich einen solchen Prüfstand mit nur einem Satz Austauschaggregate einzurichten, ist besonders für kleinere Eisenbahngesellschaften von großer Bedeutung. Damit werden erhebliche Investitionen für Prüfstände der einzelnen Aggregate eingespart. Bei Schäden an einzelnen Teilen der Maschinenanlage in einer Lokomotive werden diese mit dem entsprechenden Prüfstandsaggregat getauscht und die Lokomotive kann sofort wieder in Betrieb gehen. Es bleibt dann ausreichend Zeit, das schadhafte Teil wieder herzustellen und mit den anderen Prüfstandsaggregaten zusammen zu überprüfen. Die schnelle Tauschbarkeit der Aggregate ist durch die geringe Zahl von Zuleitungen zu den einzelnen Aggregaten gewährleistet.

Hinter der Rückwand des Führerstandes 1 ist noch eine weitere Aggregateinheit, der Umrichterschrank für die elektrische Versorgung des Zuges, untergebracht. Wird keine elektrische Zugversorgung, dagegen aber eine Vakuum-Bremseinrichtung benötigt, so wird diese an der Stelle des Umrichterschrankes eingebaut.

## 6. Anordnung der Führerräume

Beim Entwerfen der Führerräume, insbesondere der Führertische, wurde auf alle Geräte verzichtet, die nicht unbedingt für ein sicheres Führen der Lokomotive notwendig sind. So entstand ein nur mit wenigen Geräten ausgerüsteter Führertisch in übersichtlicher Bauweise (Bild 6). Da in den engen Führerräumen der Lokomotive ein den gesamten Führerraum umfassendes Bild nicht zu erstellen ist, wurde die Darstellung des Führerraummodell den folgenden Erklärungen zugrunde gelegt. Das Modell gleicht der tatsächlichen Ausführung des Führerstandes in der Lokomotive.

Der Führertisch besteht aus zwei Teilen, dem im Bild 6 rechten Teil für den Lokomotivführer und dem linken Teil für den Begleiter. Für Lokomotivführer und Begleiter ist je ein vollwertiger Arbeitsplatz mit entsprechender Fußnische und bequemer Sitzgelegenheit vorhanden. Zwischen den beiden Fußnischen befindet sich die Führerraum-Heizanlage.

Der Arbeitsplatz des Lokomotivführers ist in einen Informations- und einen Aktionsbereich unterteilt. Zum Informationsbereich gehören alle vor dem Lokomotivführer steil angestellten Geräte und zwar von links nach rechts mit folgenden Angaben:

In der viereckigen Leuchtmeldertafel sind alle üblicherweise auf dem Führertisch verstreut angeordneten Leuchtmelder zusammengefaßt. Auf der Mattscheibe der Tafel sind jeweils nur die Anzeigen zu sehen, die dem Lokomotivführer etwas zu melden haben. Im üblichen Betrieb ist dies nur die entsprechende Indusi-Anzeige. Erst beim Auftreten einer Störung oder z. B. beim Einschalten der elektrischen Zugheizung erscheint das entsprechende Symbol auf der Mattscheibe.

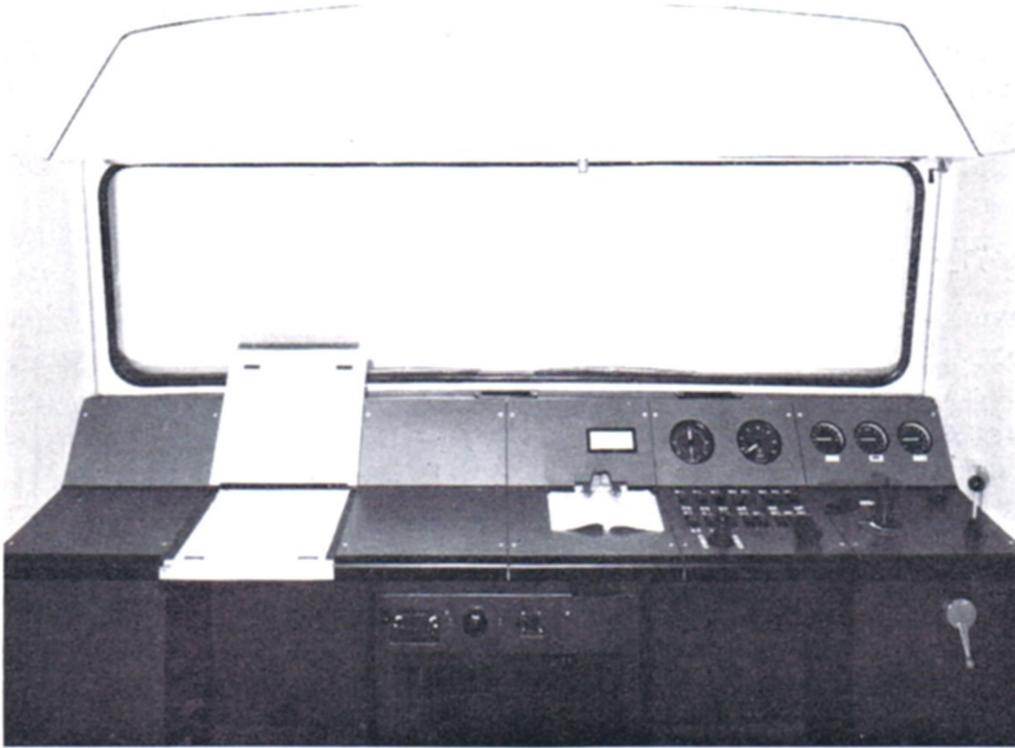
Da der Lokomotivführer über einen kleinen Hebel der Steuerungsanlage der Lokomotive nur Auf- und Abbefehle für Fahren und elektrisches Bremsen gibt, wird in dem nächsten Gerät die jeweils eingestellte Fahr- oder Bremsstufe angezeigt. Das Auf- und Abschalten der Fahrstufen wird außerdem dem Lokomotivführer akustisch mitgeteilt.

Das Gerät daneben ist der Geschwindigkeitsmesser.

Die anschließenden drei Geräte sind die üblichen Druckluftanzeigen für Hauptluftleitungsdruck, Hauptluftbehälterleitungsdruck und Bremszylinderdrücke. Die Geräte sind mit ihren Skalen derart gesetzt, daß beim üblichen Betrieb alle Zeiger in der dargestellten Weise horizontal liegen. Für die Hauptluftleitung bedeutet das einen Luftdruck von 5 kp/cm<sup>2</sup>, für die Hauptluftbehälterleitung von 10 kp/cm<sup>2</sup> und für den Bremszylinderdruck von 0 kp/cm<sup>2</sup>. Der Lokomotivführer kann somit durch einen kurzen Seitenblick feststellen, ob wesentliche Abweichungen vom Normalzustand eingetreten sind.

Der Aktionsbereich des Lokomotivführers befindet sich unmittelbar vor diesem auf der eigentlichen Führertischplatte. Neben den Schaltern für Starten des Dieselmotors, Beleuchtung, Vor- und Rückwärtsfahrten, Einschalten des Wechselrichterschrankes, Sanden, Signalgeben und für die Indusi befinden sich dort noch der Fahrshal-

Bild 6: Führertisch.



ter und ein Sifa-Drucktaster. Der Fahrschalter ist ein Kontaktgeber mit H-förmiger Schaltkulisse. Mit ihm gibt der Lokomotivführer die Auf- und Abbefehle sowohl für Fahren als auch für elektrisches Bremsen und in Mittelstellung für „Leistung schnell aus“ an die Lokomotivsteuerung weiter.

Rechts neben dem Lokomotivführer sind die Druckluftsteuergeräte zusammengefaßt.

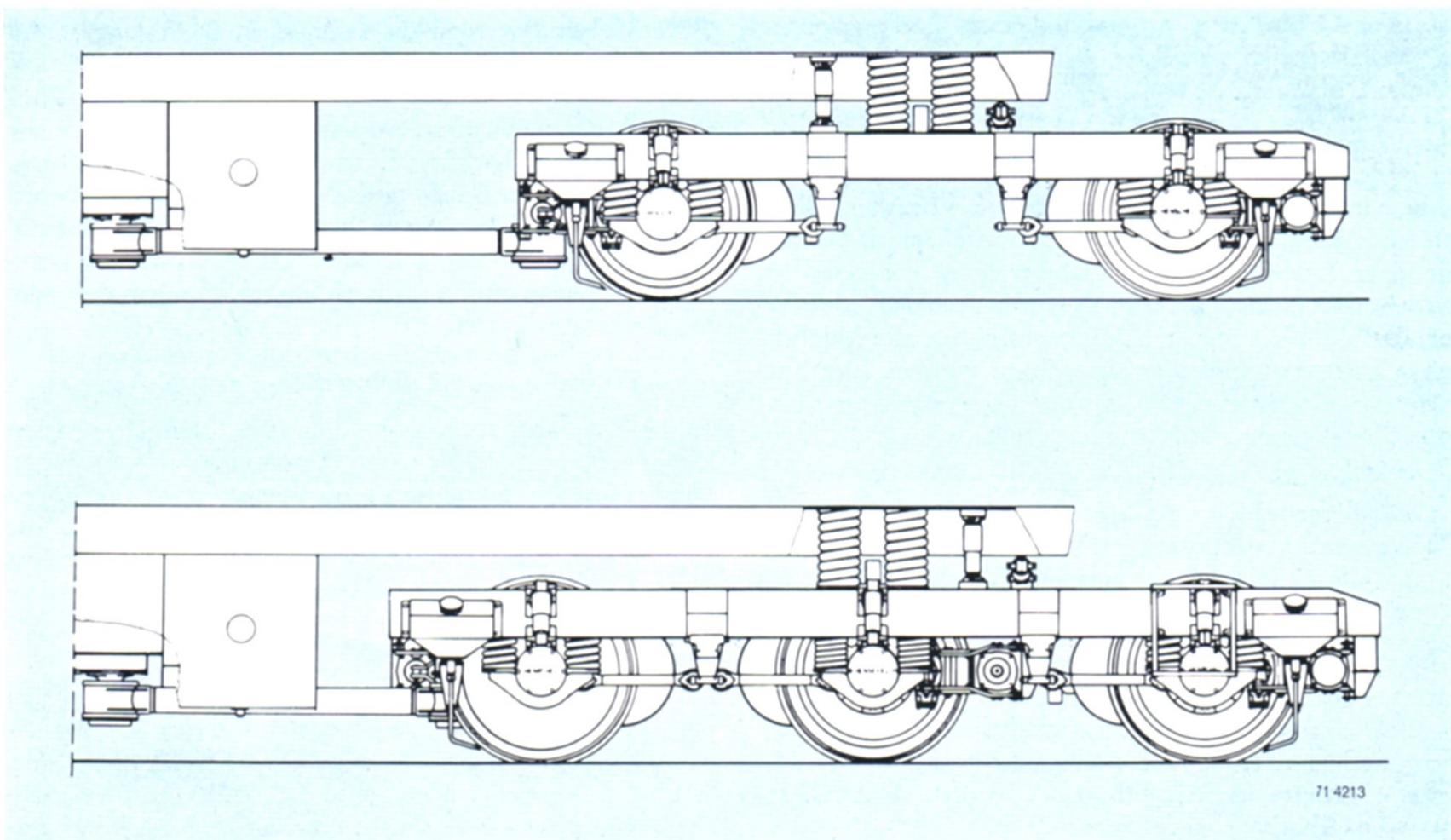
An Stelle der üblichen Beschriftung aller Geräte und Schalter wurden allgemein verständliche Symbole entwickelt. Die umfangreichen Versuchsfahrten im Bereich der DB haben gezeigt, daß die Lokomotivführer sich erstaunlich schnell auf diesem einfachen und übersichtlichen Führertisch zurechtfinden. Nicht unwesentlich tragen au-

ßer der Gestaltung des Führertisches auch die im Bild nicht dargestellten sehr bequemen Führersitze zum Wohlbefinden der Lokomotivführer bei.

### 7. Laufwerk

Für die DE 2500 wurde ein Laufwerk angestrebt, das auf schlechtem Oberbau ein Mindestmaß an Beanspruchungen für die Lokomotive und das Gleis ergibt und bei Fahrten mit höherer Geschwindigkeit auf gutem Gleis beste Laufeigenschaften gewährleistet. Die Höchstgeschwindigkeit der Lokomotive von 140 km/h wurde auf Grund der Dieselmotorleistung willkürlich festgelegt. Höhere Geschwindigkeiten lassen sich im Regelverkehr bei einer Dieselmotorleistung von 2 500 PS we-

Bild 7: Seitenansicht der Drehgestelle der DE 2500.



71 4213

gen des verbleibenden geringen Beschleunigungsüberschusses auch bei kleinen Zuglasten nicht sinnvoll fahren. Fahrmotoren, Laufwerk und Bremse erlauben aber noch höhere Geschwindigkeiten. Bis zur derzeitigen Lokomotivhöchstgeschwindigkeit von 140 km/h konnte während der Versuchsfahrten beobachtet werden, daß die angestrebten guten Laufeigenschaften voll erreicht wurden (Bild 7).

Es gehört heute im Lokomotivbau zum Stand der Technik, daß der Lokomotivkasten auf den Drehgestellen in Lokomotivquerrichtung elastisch und überkritisch gelagert wird. Durch diese Entkopplung der Drehgestell- und Lokomotivmassen wird eine drastische Verminderung der Spurführungskräfte zwischen Radsatz und Gleis und zugleich eine wesentliche Verbesserung der Laufeigenschaften erreicht. Hierbei muß jedoch beachtet werden, daß die Einrichtungen zur Übertragung der Zug- und Bremskräfte vom Drehgestellrahmen auf den Lokomotivkasten diese Querverfederung nicht behindern.

Vertikal ist der Lokomotivkasten auf den Drehgestellen über acht Stahlschraubenfedern abgestützt. Diese Federn übernehmen auch die elastische Querführung zwischen Lokomotivkasten und Drehgestellrahmen. Beim Einlauf in Krümmungen werden diese Federn zusätzlich durch die Ausdrehung der Drehgestelle gegenüber dem Lokomotivkasten verformt. Eine Gleitführung ist an keiner Stelle vorhanden. Zur Übertragung der Zug- und Bremskräfte werden von den inneren Drehgestell-Endstreben gummigelagerte Lenker zur Lokomotivmitte hin benutzt.

Nachdem sich das von Rheinstahl Transporttechnik mit der BR 103 bei der DB eingeführte System der

überkritischen querelastischen Lagerung zwischen Lokomotivkasten und Drehgestell gut bewährt hatte, wurde bei der DE 2500 ein weiterer Schritt getan. Das gleiche System einer überkritischen querelastischen Lagerung über die Vertikalfedern und einer Übertragung der Zug- und Bremskräfte in Längsrichtung über Lenker mit geringer Längselastizität wurde auch zwischen den Achslagern und dem Drehgestellrahmen angewandt. Somit läuft der Drehgestellrahmen bereits gegenüber dem Radsatz in Querrichtung überkritisch. Bei der Auslegung dieser Querverfederung müssen die Verhältnisse zwischen dem Radreifenprofil und der Schiene berücksichtigt werden. Die Fahrmotoren sind gegenüber dem Drehgestellrahmen in Pendeln aufgehängt und behindern somit nicht die Querelastizität der Achslagerung. Es ist aus dem ersten Wagen hinter der DE 2500 durch die Fenster in der Übergangstür sehr gut zu beobachten, daß durch den überkritischen Lauf die an den Drehgestell-Enden angebrachten Schienenräumer gegenüber der Schiene kaum schwingende Bewegungen ausführen. Auch bei Streckenabschnitten mit schlechtem Oberbau wirkt sich die Entkopplung der Radsatz- und Fahrmotormassen gegenüber dem Drehgestellrahmen derart aus, daß in der Querverfederung zwischen dem Lokomotivkasten und dem Drehgestellrahmen nur in ganz außergewöhnlichen Fällen nennenswerte Ausschläge auftreten.

Die sehr kleinen Asynchron-Fahrmotoren stützen sich außer über die Pendel zum Drehgestellrahmen noch über Tatzlager auf die Treibradsätze ab (Bild 2). Tatzlagerungen mit Gleitlagern und mit Zylinderrollenlager befinden sich in der Erprobung.

**Werner Teich**

## Elektrische Leistungsübertragung

### 1. Allgemeines

Für die Entwicklung der neuen Leistungsübertragung war zu fordern, die Vorteile der herkömmlichen elektrischen Ausrüstung für Diesellokomotiven, aber auch die der hydraulischen Leistungsübertragung, wie geringes Gewicht, zu erhalten. Nach umfangreichen Voruntersuchungen und Vergleichsstudien war festzustellen, daß allein mit einer Drehstrom-Leistungsübertragung die gestellten Forderungen zu erfüllen sind. Es wurde auch deutlich sichtbar, daß die Ziele nur erreichbar sind, wenn alle Möglichkeiten bestens aufeinander abgestimmt werden. Der Entwicklungsplan war diesen Forderungen anzupassen; er wurde in folgende Abschnitte unterteilt:

1. Theoretische Untersuchungen,
2. Modellversuche 1 : 10,
3. Bau von Labormustern im Maßstab 1 : 1,
4. Bau der Originaleinrichtung mit Erstellung des ersten Lokomotiv-Prototyps.

Nach Abschluß jedes Abschnitts wurde eine technische und wirtschaftliche Bilanz aufgestellt, wie dies bereits im Teil „Lokomotivtechnische Gesichtspunkte“ dargelegt ist. Nachdem auch der vierte Abschnitt positiv abgeschlossen war, konnte der Beschluß gefaßt werden, weitere Prototyp-Lokomotiven zu fertigen.

Nachfolgend werden die technischen Bedingungen und Ausführungen des ersten Prototyps Henschel-BBC-DE 2500 beschrieben. Bild 8 zeigt die Anordnung der Baugruppen der Drehstromleistungsübertragung, Bild 9 die Anordnung der herkömmlichen elektrischen Ausstattung. Die aufgrund der Meß- und Prüfergebnisse gewonnenen Erfahrungen mit dem ersten Prototyp führten zu weiteren Optimierungen an den folgenden Lokomotiven. Zu gegebener Zeit werden diese Abweichungen in einem besonderen Aufsatz erläutert.

### 2. Fahrmotor

Für den Antrieb werden die einfachsten elektrischen Maschinen, schleifringlose Asynchronmotoren, verwendet. Diese Motoren erlauben einen Betrieb mit sehr hohen Drehzahlen bei guter Raumausnutzung, so daß für die angestrebten Motorleistungen geringe Gewichte erreicht werden. Bei dem geringen Gewicht der Motoren ohne Kollektor mit Bürstenhalter und Bürsten ist ein Tatzlagerantrieb auch bei hohen Geschwindigkeiten möglich.

Diesen Vorteilen steht aber ein entscheidender Nachteil des Asynchronmotors gegenüber, nämlich der Kennlinienverlauf „Drehmoment als Funktion der Drehzahl“ bei einer gegebenen Frequenz. Bild 10 zeigt einen Vergleich der gewünschten Traktionskennlinie mit der Charakteri-

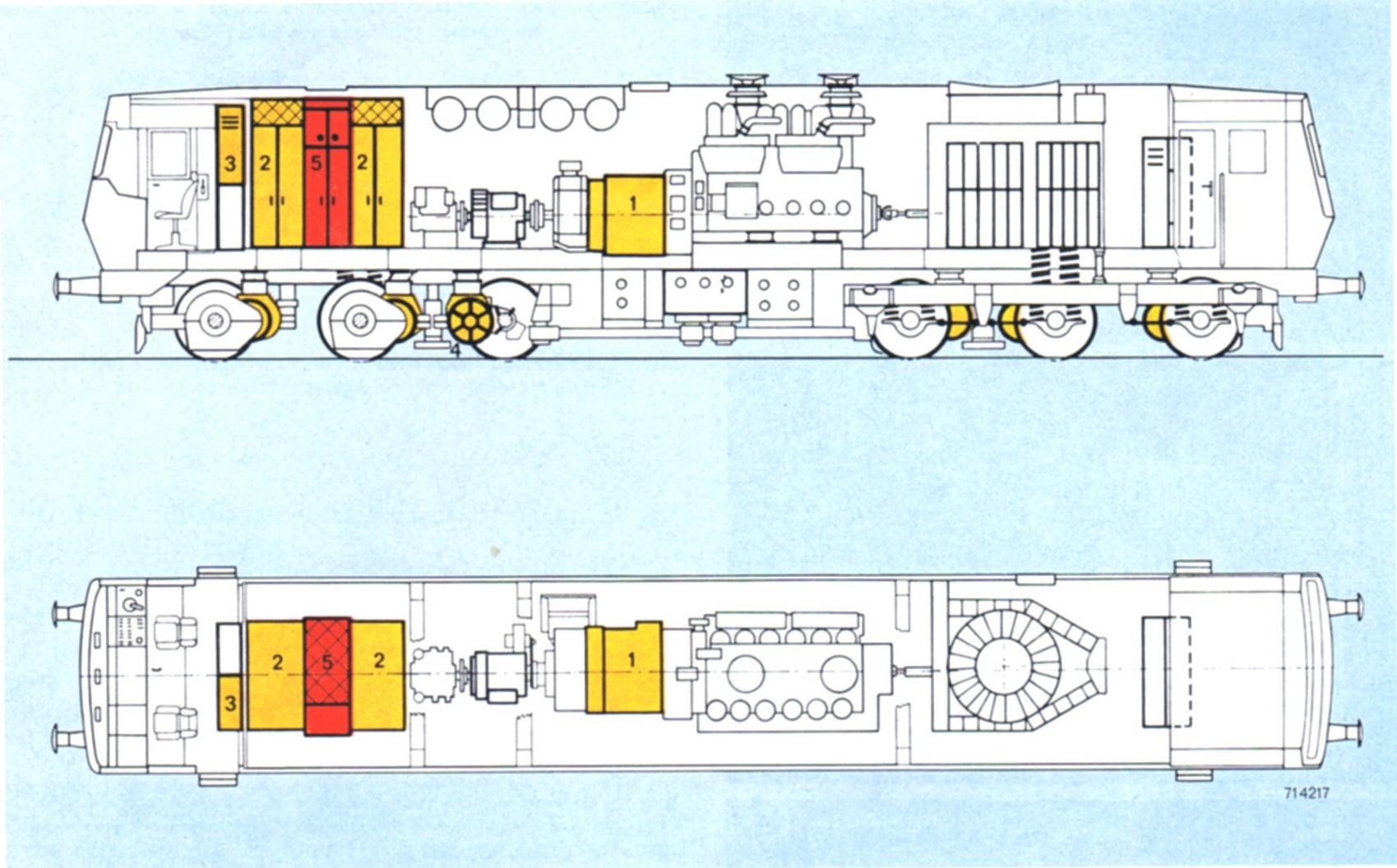


Bild 8: Anordnung der Drehstromleistungsübertragung.

- |                     |                           |                           |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 Synchrongenerator | 3 elektronische Steuerung | 5 Bremswiderstand, Lüfter |
| 2 Wechselrichter    | 4 Asynchronfahrmotoren    |                           |

stik eines Asynchronmotors bei einer festen Frequenz. Die Leerlaufdrehzahl erreicht annähernd die durch die Gleichung

$$n = \frac{f_1}{p} \times 60$$

gegebene synchrone Drehzahl [U/min], wobei für  $f_1$  die Frequenz [Hz] und für  $p$  die Polpaarzahl der Maschine einzusetzen sind.

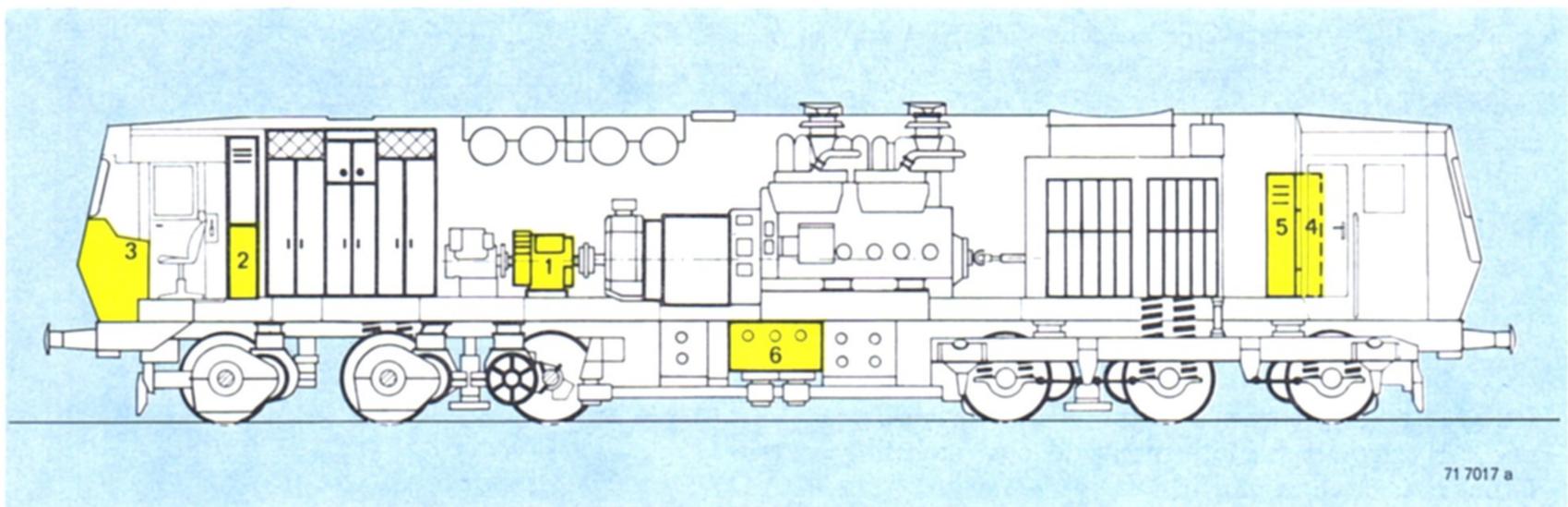
Bei zunehmender Last fällt die Motordrehzahl immer mehr gegenüber der synchronen Drehzahl ab, bis bei dem sogenannten Kippmoment die Maschine instabil wird und die Drehzahl auf 0 sinkt. Die gewünschte Traktionskurve  $T$  schneidet die Momentenkennlinie (AS) des Asynchron-

motors also immer in zwei Punkten ( $P_0$  und  $C$ ). Für einen wirtschaftlichen Antrieb interessiert nur der steile Ast (Schnittpunkt  $P_0$ ) der charakteristischen Kennlinie. Es müssen daher unendlich viele Kennlinien einstellbar sein, damit bei jeder Geschwindigkeit nur der steile Ast in Anspruch genommen werden kann.

Aus dieser Bedingung ergibt sich die Forderung, die speisende Frequenz stufenlos zu verändern. Bild 11 zeigt, wie die Frequenz als Funktion der Fahrgeschwindigkeit verändert werden muß. Die kleinste einstellbare Frequenz beträgt dabei etwa 0,1 Hz. Die höchste einstellbare Frequenz ist bei dem ersten Prototyp mit 125 Hz entsprechend einer Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h festgelegt.

Bild 9: Anordnung der herkömmlichen elektrischen Ausrüstung.

- |                                                   |                                          |                                     |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 Lichtanlaßmaschine                              | 3 Fahrpult                               | 5 Wechselrichter für die Zugheizung |
| 2 Fahrsteuerung, Regler, Anlagenüberwachung, Sifa | 4 Indusi, Ladegerät, Hilfswechselrichter | 6 Starterbatterie                   |



71 7017 a

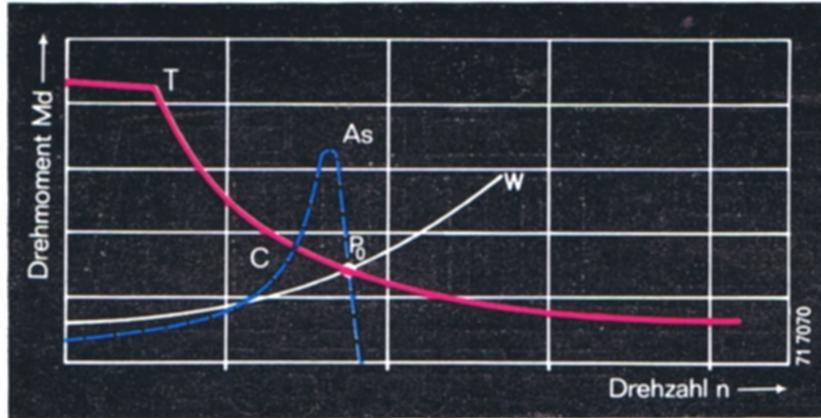


Bild 10: Vergleich der Traktionskennlinie mit der Charakteristik eines Asynchronmotors bei einer festen Frequenz.

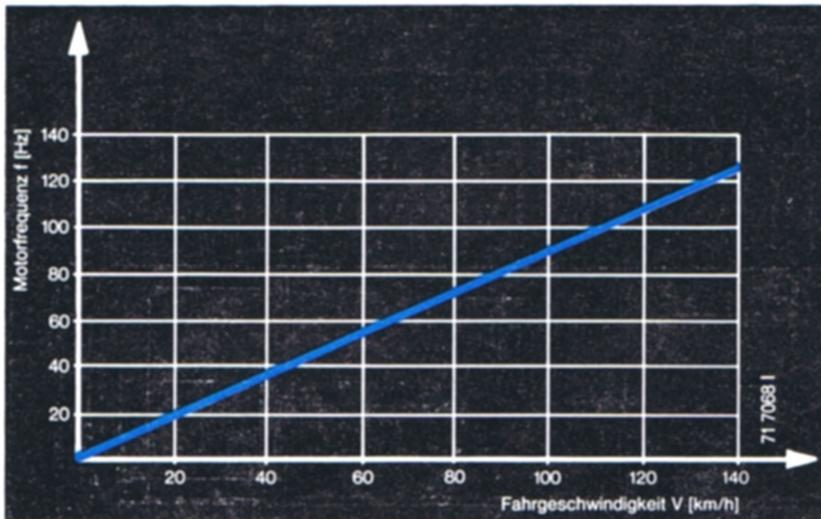


Bild 11: Notwendige Frequenzeinstellung als Funktion der Fahrgeschwindigkeit.

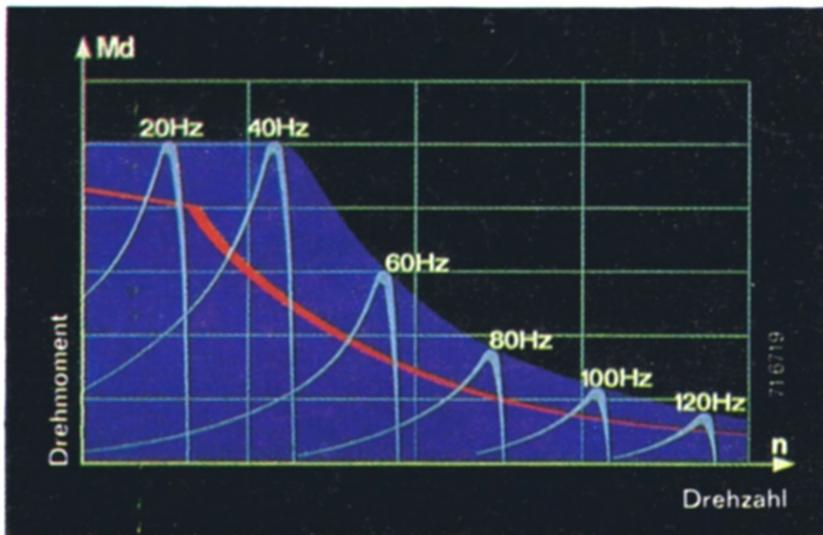


Bild 12: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie für einen Asynchronmotor bei Betrieb mit verschiedenen Frequenzen, Ortskurve der Kippmomente.

Der Fahrmotor ist so ausgelegt, daß das Kippmoment bei allen Drehzahlen über dem geforderten Traktionsmoment liegt (Bild 12).

Auch für den Fahrmotor galt es, optimale Bedingungen zu finden. Hinsichtlich der Konstruktion ergeben sich bei einem festgelegten Raddurchmesser bestimmte mögliche Abmessungen des Fahrmotors. Die Drehzahl des Fahrmotors liegt ebenfalls fest, wenn davon ausgegangen wird, daß das kleinste technisch herstellbare Fahrmotorritzel und das größtmögliche Großrad verwendet werden. Bei diesen Voraussetzungen ist das Raumangebot (Bild 13) für die Fahrmotorenkonstruktion eindeutig gegeben, wobei der Fahrmotordurchmesser aus der folgenden Gleichung errechnet wird:

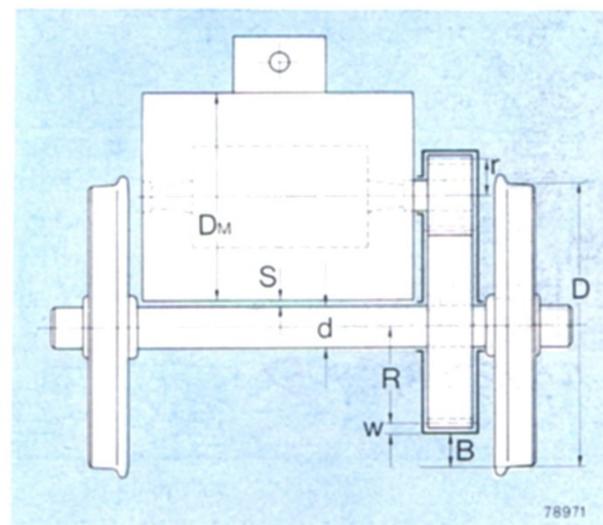
$$D_M = 2 \cdot \left( \frac{D - A}{2} - B - w - \frac{d}{2} - S + r \right).$$

Für die Konstruktion der Fahrmotoren ergeben sich aus diesen Grenzbetrachtungen entscheidende Fragen:

Ist bei der vorgesehenen Fahrmotor-Bauart ein Betrieb mit der errechneten Höchstdrehzahl aus mechanischen Gründen überhaupt möglich?

Bild 13: Angaben für die Berechnung des möglichen Fahrmotordurchmessers bei einstufigem Getriebe.

- $D_M$  = Motordurchmesser
- $D$  = Raddurchmesser (neu)
- $A$  = mögliche Radabnutzung
- $B$  = Bodenfreiheit
- $w$  = kleinster Abstand von Außenseite des Zahnradschutzkastens bis Teilkreisdurchmesser des Großrades
- $d$  = Achswellendurchmesser
- $S$  = kleinster zulässiger Abstand zwischen Achswelle und Fahrmotorgehäuse
- $r$  = Teilkreishalbmesser des Ritzels



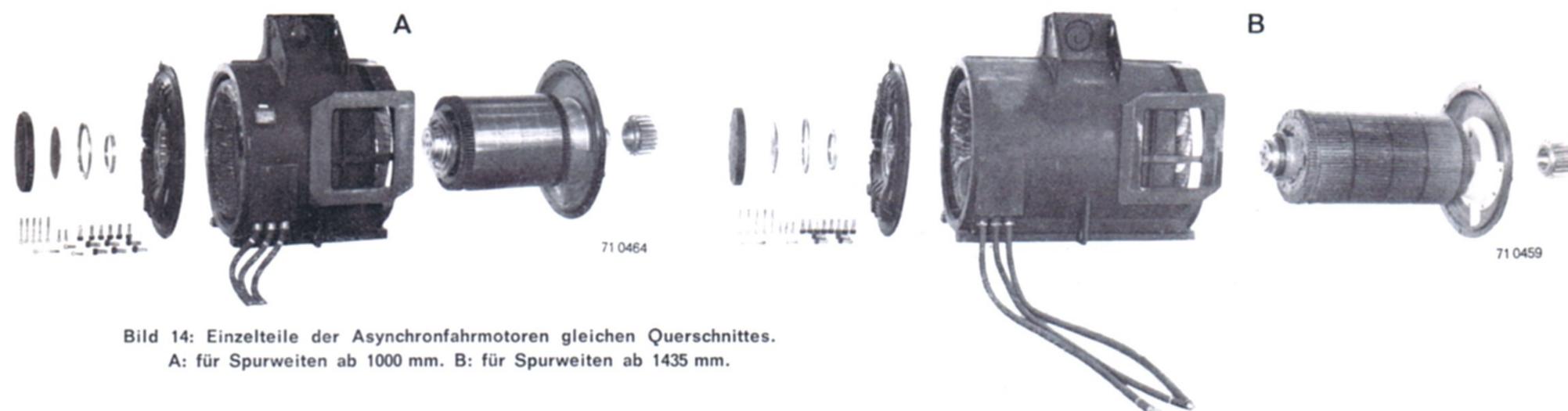


Bild 14: Einzelteile der Asynchronfahrmotoren gleichen Querschnittes.  
A: für Spurweiten ab 1000 mm. B: für Spurweiten ab 1435 mm.

Reicht das Raumangebot für die Unterbringung der vorgesehenen Leistung aus?

Beim Drehstrom-Asynchronmotor können beide Fragen wegen des Fehlens von Kollektor mit Zubehör und wegen der guten Raumausnutzung bejaht werden. Damit liegt auch der Fahrmotor bei einem Antrieb mit einstufigem Getriebe im „optimalen Punkt“.

Wenn zur Unterbringung der vorgesehenen Leistung ein größerer Durchmesser des Fahrmotors nötig ist, dann wird der Mittenabstand zwischen Achswelle und Motorwelle ebenfalls größer. Dieser vergrößerte Mittenabstand kann nur durch einen vergrößerten Durchmesser des Ritzels überbrückt werden, weil der Durchmesser des Großzahnades durch die Bodenfreiheit bestimmt ist. Dadurch wird die Übersetzung kleiner, das notwendige Drehmoment wird größer und die Drehzahl sinkt.

Es kann festgehalten werden, daß der Motor bei Abweichungen vom optimalen Punkt überproportional schlechter wird.

Entsprechend der gestellten Aufgabe und unter Berücksichtigung der vorstehenden Gesichtspunkte wurden für das Typenprogramm DE 2500 zwei Fahrmotorvarianten

entwickelt, eine Ausführung für Spurweiten ab 1 000 mm und eine solche für Spurweiten ab 1 435 mm. Um eine rationelle Fertigung sicherzustellen, wurden die Motoren mit gleichen Querschnitten gebaut. Bild 14 zeigt die Einzelteile der Motoren. Es sind praktisch alle Teile gleich bis auf diejenigen, die mit der Längenentwicklung des Motors zusammenhängen, wie Welle, Gehäuse und Wicklung.

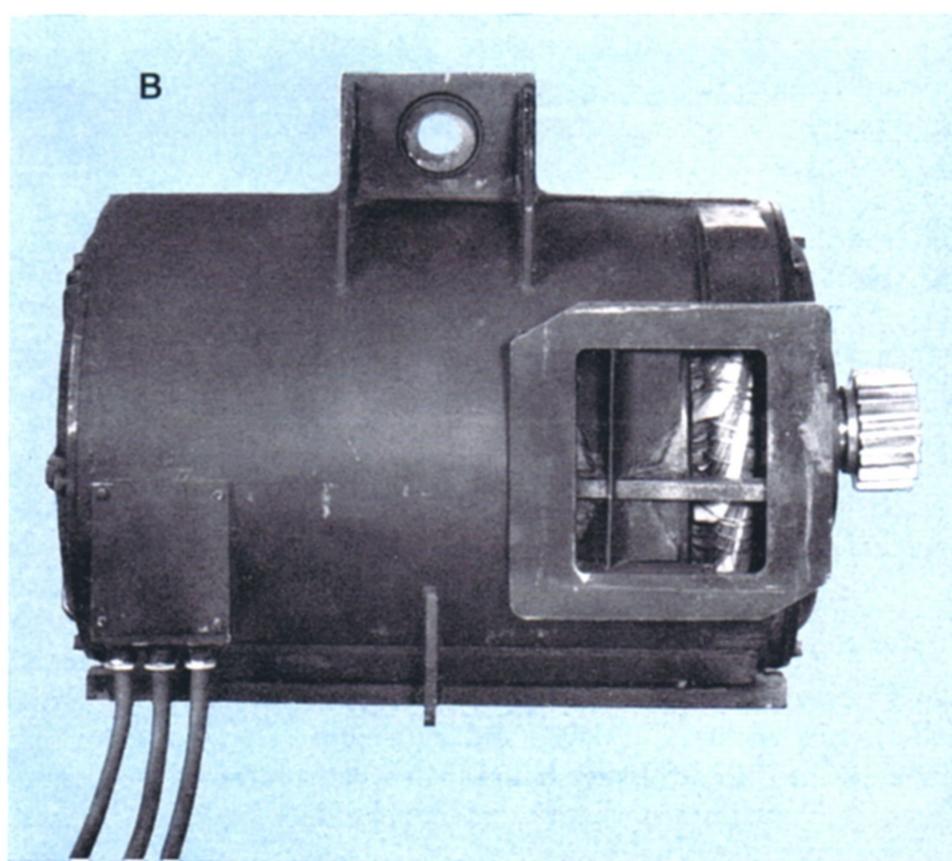
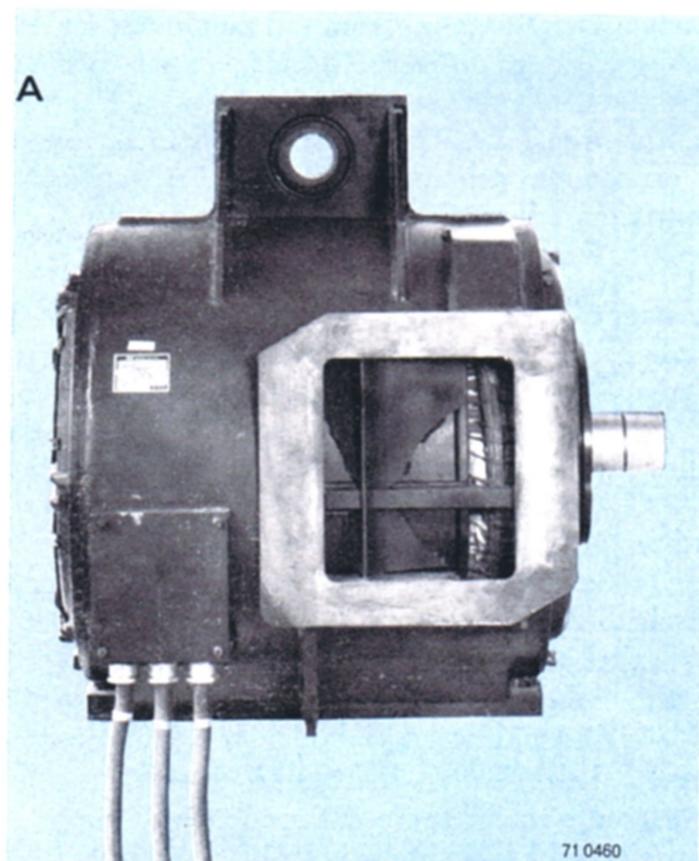
Der Ständer des Drehstrom-Kurzschlußläufer-Fahrmotors ist in Schweißkonstruktion mit selbsttragendem Blechpaket gefertigt.

Bild 15 zeigt die Außenansicht der beiden Fahrmotortypen.

Die unabgefederten Fahrmotormassen des Drehstromantriebes liegen beim Motor der normalspurigen Lokomotive etwa in der gleichen Größenordnung wie die unabgefederten Massen des Achstriebs bei Lokomotiven mit hydraulischer Leistungsübertragung. Entsprechend dem geringeren Motorgewicht sind die Verhältnisse bei Fahrzeugen der 1 000-mm-Spur noch günstiger.

Der abgefederte Gewichtsanteil wird durch eine mit Vericell-Elementen bestückte Aufhängung verschleißfrei auf den Drehgestellrahmen übertragen. Der Fahrmotor

Bild 15: Außenansicht der Asynchronfahrmotoren.  
A: für Spurweiten ab 1000 mm. B: für Spurweiten ab 1450 mm.



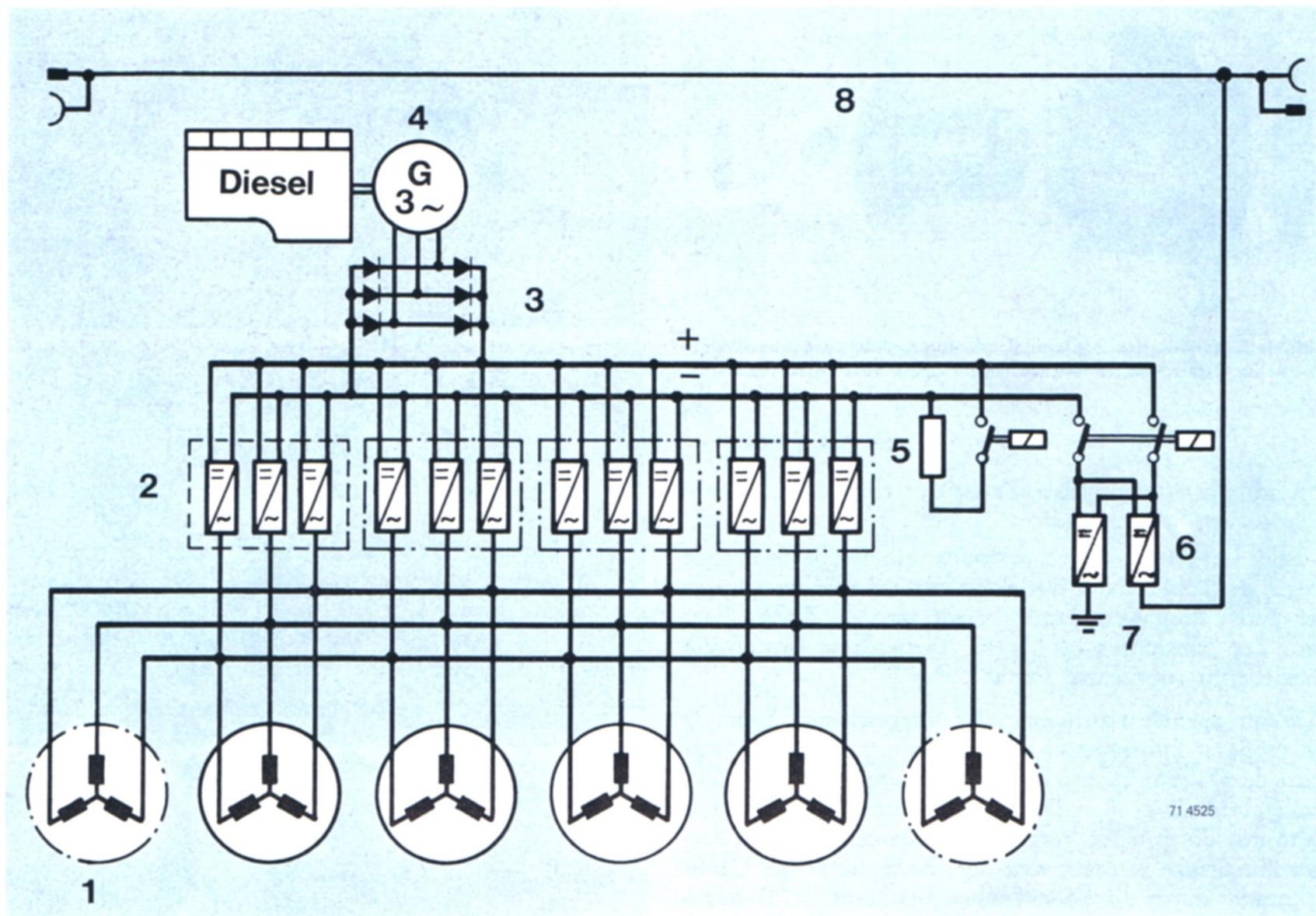


Bild 16: Hauptschaltbild der Drehstromleistungsübertragung.

- |                  |                     |                            |                                 |
|------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 1 Fahrmotoren    | 3 Gleichrichter     | 5 Bremswiderstand          | 7 Erdungskontakt                |
| 2 Wechselrichter | 4 Synchrongenerator | 6 Wechselrichter „Heizung“ | 8 durchgehende Zugsammelschiene |

Hauptdaten der Motoren

|                            | Asynchronfahrmotor für Lokomotiven der 1 000 mm-Spur 1 435-mm-Spur |              |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------|
| Typ                        | QD 335 S 4                                                         | QD 335 N 4   |
| Einsatzleistung in DE 2500 | 250 kW                                                             | 375 kW       |
| Spannung                   | 1 000 V                                                            | 1 000 V      |
| Polzahl                    | 4                                                                  | 4            |
| Einsatzdrehzahl in DE 2500 | 3 700 U/min                                                        | 3 700 U/min  |
| Gewicht                    | rd. 1 100 kg                                                       | rd. 1 800 kg |
| Durchmesser                | 660 mm                                                             | 660 mm       |
| Länge über Welle           | 857 mm                                                             | 1 187 mm     |

kann wahlweise für Tatzlager- oder Gestellantrieb verwendet werden. Für die Tatzlagerausführung sind zwei Lagerarten entworfen und erprobt

- a) Gleitlager,
- b) Rollenlager.

Die Tatzlagerung ist ein Teil des Radsatzes; die Trennstelle liegt zwischen Tatzlager und Fahrmotor. Der Radsatz einschließlich der Lagerstelle für den Fahrmotor kann daher fertig zusammengebaut werden, ohne daß der Fahrmotor hierfür notwendig ist.

### 3. Umrichteranlage

Der Traktionsumrichter muß die Ausgangsspannung und die Frequenz unabhängig voneinander und unabhängig von der Drehzahl des Synchronhauptgenerators einstellen können. Der Ausgangsstrom soll zumindest im Anfahrbereich möglichst sinusförmig sein, damit sich ein gleichbleibendes Drehmoment ergibt und in den Fahrmotoren möglichst wenig Zusatzverluste entstehen. Diese Forderungen erfüllt der gebaute Umrichter. Er besteht aus drei Hauptteilen, dem Gleichrichter, Gleichstrom-Zwischenkreis und Wechselrichter.

Bild 16 zeigt die Gesamtschaltung der Lokomotive. Der Gleichrichter ist in Drehstrom-Brückenschaltung mit Siliziumdioden aufgebaut. An ihn schließt sich der Zwischenkreis an, der aus einem Kondensator hoher Kapazität besteht. Die Spannung des Gleichstrom-Zwischenkreises (z. Z. 1 200 V, wird auf 1 300 V erhöht) wird vom Wechselrichter in eine dreiphasige Motorspannung unterschiedlicher Höhe und veränderbarer Frequenz umgeformt. Der Wechselrichter selbst besteht aus vier Teilwechselrichtern, die parallel geschaltet sind und auf eine gemeinsame Drehstromsammelschiene arbeiten. An diese Drehstromsammelschiene sind wahlweise vier oder sechs Fahrmotoren angeschlossen. Jeder Teilwechselrichter besteht aus drei Grundeinheiten, je einer für eine Phase. Dieser Grundbaustein ist der eigentliche Wechselrichter. Er muß in der Lage

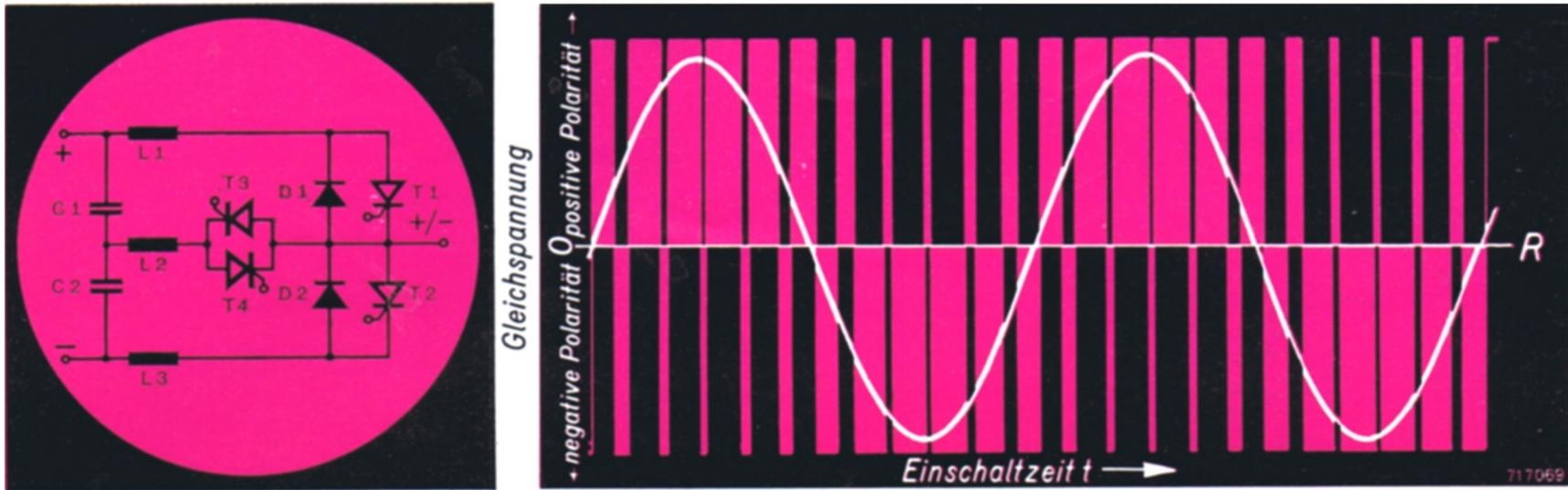


Bild 17: Schaltung der Wechselrichter und Arbeitsweise des Unterschwingungsverfahrens.

sein, die Frequenz stufenlos von etwa 0 Hz bis 125 Hz zu wandeln.

Der wichtigste Teil für die Frequenzwandlung ist der Thyristor in Verbindung mit normalen Siliziumdioden. Mit diesen beiden Halbleiterelementen und zugehörigen Kommutierungsdrosseln und -kondensatoren wird ein elektronischer Schalter aufgebaut, der es ermöglicht, die Gleichspannung in die gewünschte Wechselspannung umzuformen. Für den Wechselrichter wird das im Hause BBC entwickelte Unterschwingungsverfahren [1] für den Anfahrbereich angewendet. Bild 17 zeigt die Schaltung und die grundsätzliche Arbeitsweise. Gleichspannungsblöcke werden mit wechselnder Polarität auf die Motorphase geschaltet. Die Schaltfolge ist dabei so abgestimmt, daß der Mittelwert sinusförmig verläuft. Die Motorphase wird also in rascher Folge von Plus- auf Minuspolarität und umgekehrt geschaltet. Infolge der Streuinduktivität des Asynchronmotors kann der Strom einer plötzlichen Spannungsänderung nur verzögert folgen. Bei einem positiven Spannungsblock steigt der Strom etwas an, bei einem negativen fällt er wieder ab. So läßt sich jede vorgegebene Sollkurve nachfahren. Die graphische Darstellung veran-

schaulicht diese Vorgänge. Da die Ströme in den drei Phasen jeweils um  $120^\circ$  gegeneinander verschoben sind, bilden sie ein Drehstromsystem.

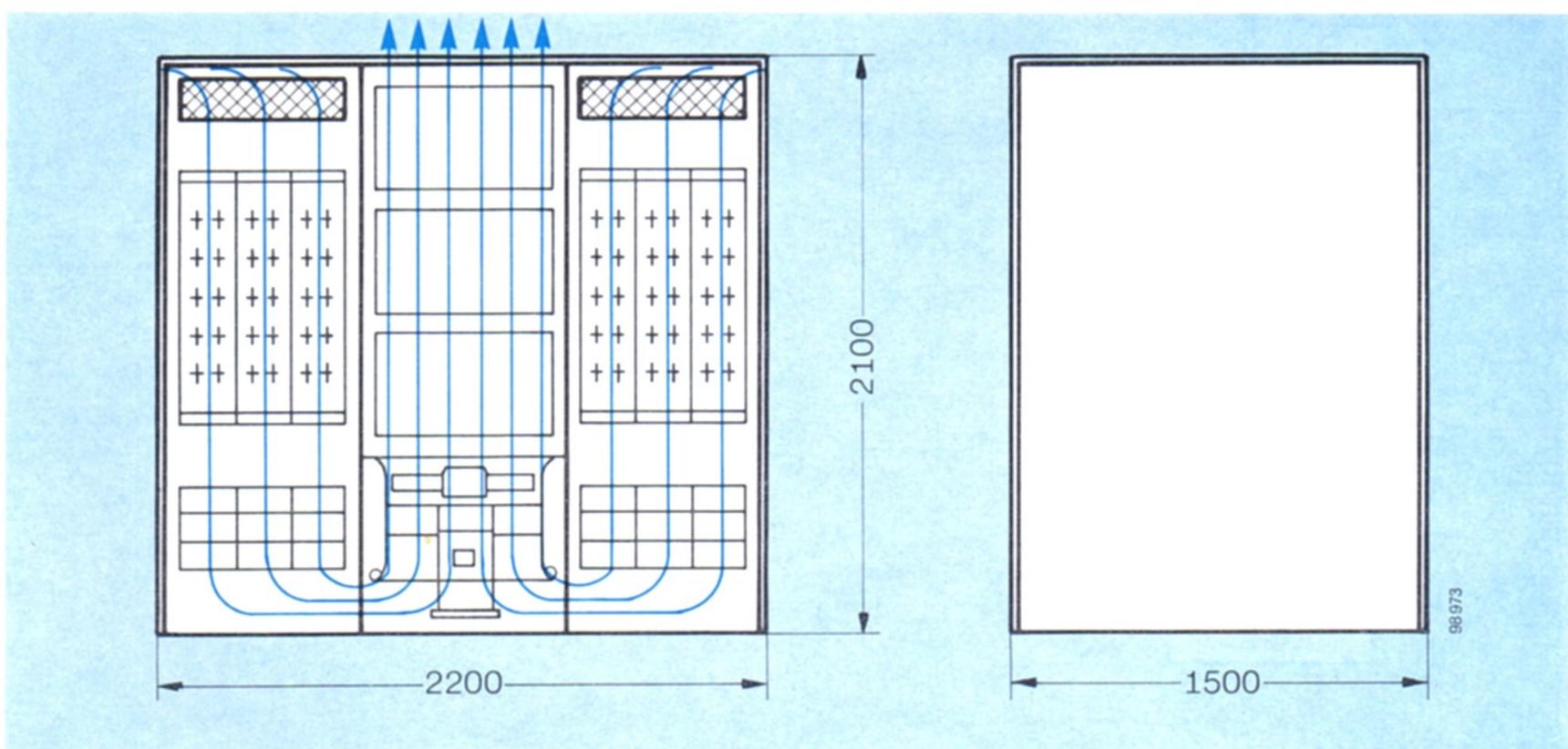
In einphasigen Wechselrichter-Bausteinen (Bild 19) sind jeweils alle Bauteile zusammengefaßt, die zum Aufbau des Starkstromkreises notwendig sind, ausgenommen die Kommutierungsdrosseln und -kondensatoren nach der Schaltung in Bild 17.

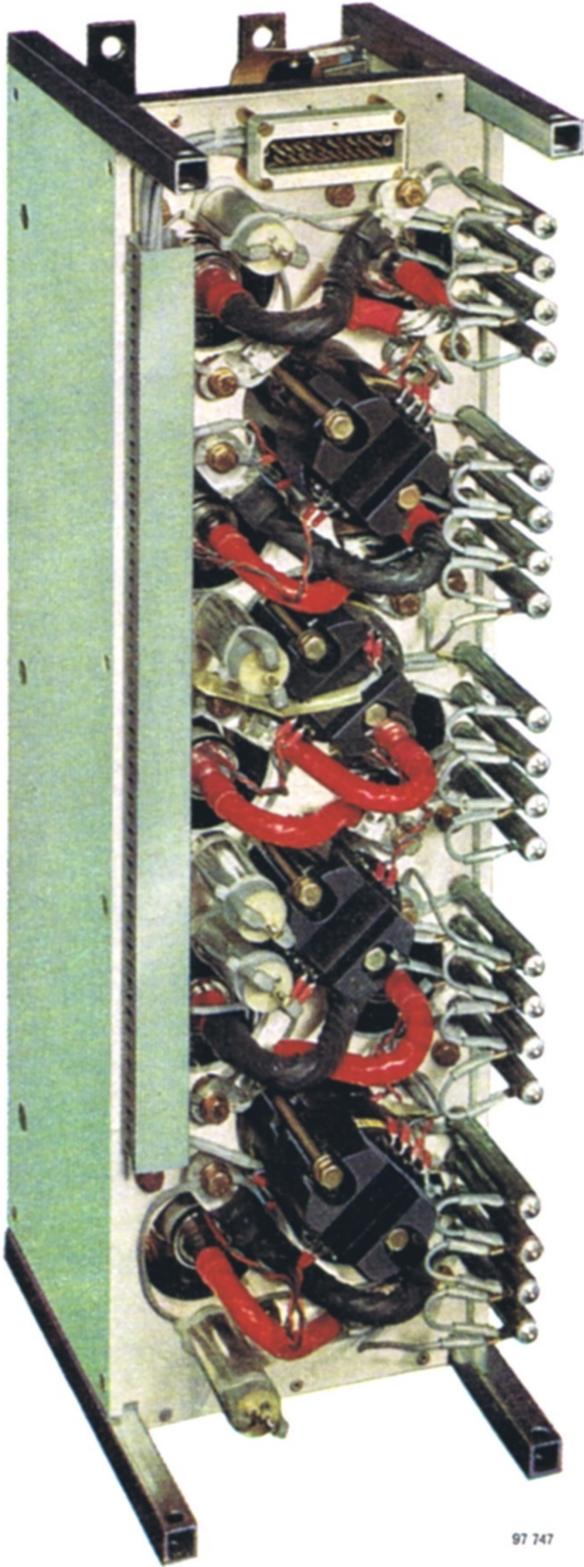
In der Lokomotive DE 2500 sind zwölf einphasige Wechselrichter-Bausteine verwendet. Bild 18 zeigt den Umrichterschrank, der die vollständige Starkstrom-Elektronik einschließlich Bremswiderstandes und Belüftungsanlage enthält.

Der Umrichterschrank ist in drei Hauptgruppen gegliedert. Die beiden äußeren Baugruppen sind gleich und bestehen jeweils aus zwei dreiphasigen Wechselrichtern. In der mittleren Baugruppe sind der Widerstand der E-Bremse, die Bauteile für die Generatorerregung und die Schutz-einrichtungen des Leistungskreises angeordnet.

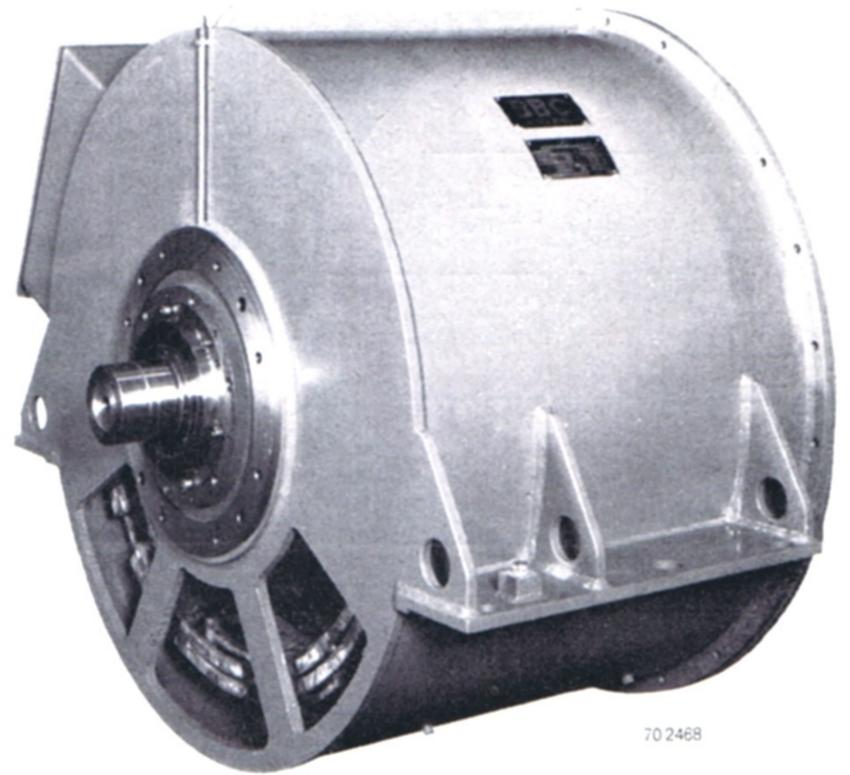
Die Nennleistung eines dreiphasigen Systems beträgt z. Z. 700 kVA, die Gleichstrom-Zwischenkreisspannung 1 200/1 300 V.

Bild 18: Umrichterschrank.





97 747

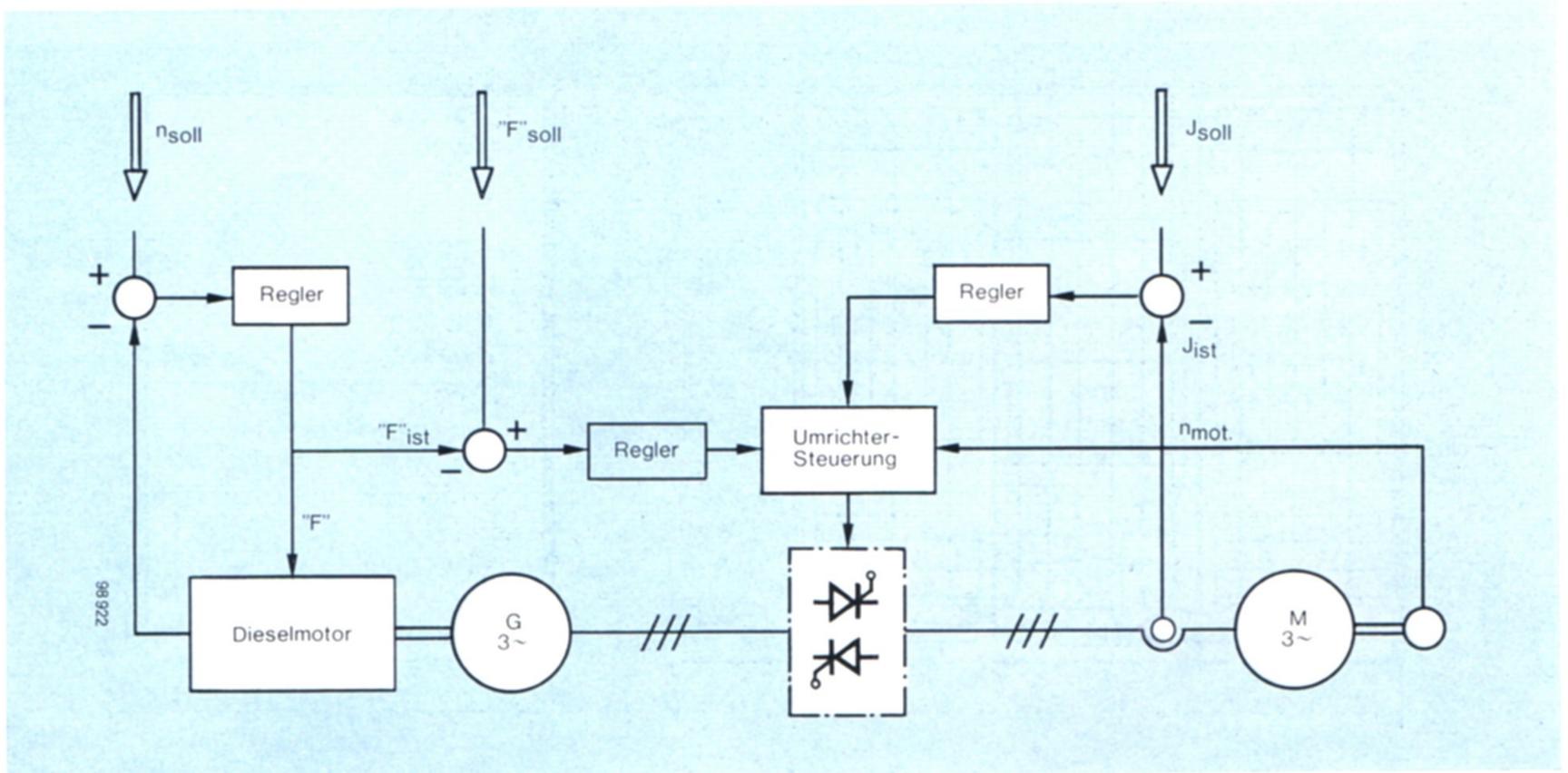


70 2468

Bild 20: Optimierter Synchrongenerator für die DE 2500.

◀ Bild 19: Einphasiger Wechselrichter-Baustein.

Bild 21: Steuerschema der Drehstromleistungsübertragung.



Zwei elektrisch angetriebene Lüfter ziehen die Luft durch die einzelnen Wechselrichtereinschübe nach unten, dann werden die Luftströme im Schrank umgelenkt, gesammelt und durch den Widerstand der elektro-dynamischen Bremse nach oben ins Freie abgeführt. Umrichter und Bremswiderstand sind also lufttechnisch hintereinander geschaltet. Diese Verbindung der Belüftung hat auf die Abmessungen des Bremswiderstandes keinen Einfluß, da die Temperaturerhöhung aufgrund geringer Verluste im Umrichter sehr klein ist, der Bremswiderstand aber mit sehr hohen Temperaturen betrieben wird.

#### 4. Hauptgenerator

Für die Größenbemessung des Hauptgenerators sind bei der Drehstrom-Leistungsübertragung die Bedingungen äußerst günstig. Der Generator ist praktisch nur für die Wirkleistung des Dieselmotors auszulegen, da Rückwirkungen aus der Traktion nicht auftreten. Die „Spannungs- und Stromwandlung“ zur Anpassung an die Fahrmotordaten übernimmt rückwirkungsfrei die Wechselrichteranlage. Bekanntlich ist die Dimensionierungsleistung — Dauerstrom mal höchste Spannung — des Hauptgenerators in der herkömmlichen Gleichstromübertragung

[2, 3] immer größer als die Wirkleistung des Dieselmotors. Denn einmal ist der Generator für den höchsten Dauerstrom entsprechend der höchsten Dauerzugkraft und zum anderen für die höchste Spannung entsprechend der höchsten Geschwindigkeit auszulegen. Da beide Werte niemals zusammen auftreten können, ergibt sich eine entsprechende Überdimensionierung des Hauptgenerators; ihre Größe wird durch die Einsatzbedingungen des Fahrzeuges bestimmt, wobei eine notwendige Überdimensionierung von 40 bis 50 % durchaus üblich ist.

Der optimierte Generator der DE 2500 hat folgende Hauptdaten:

|              |                  |
|--------------|------------------|
| Nennleistung | 1 800 kW,        |
| Drehzahl     | 600—1 500 U/min, |
| Frequenz     | 40 bis 100 Hz,   |
| Gewicht      | 2,4 t,           |
| Spannung     | 1 000 V,         |
| cos phi      | 0,95,            |
| Polzahl      | 8,               |
| Erregung     | schleifringlos.  |

Der Generator ist mit einem Lager ausgeführt. Der Läufer stützt sich auf der Gegenseite über eine Stahl-

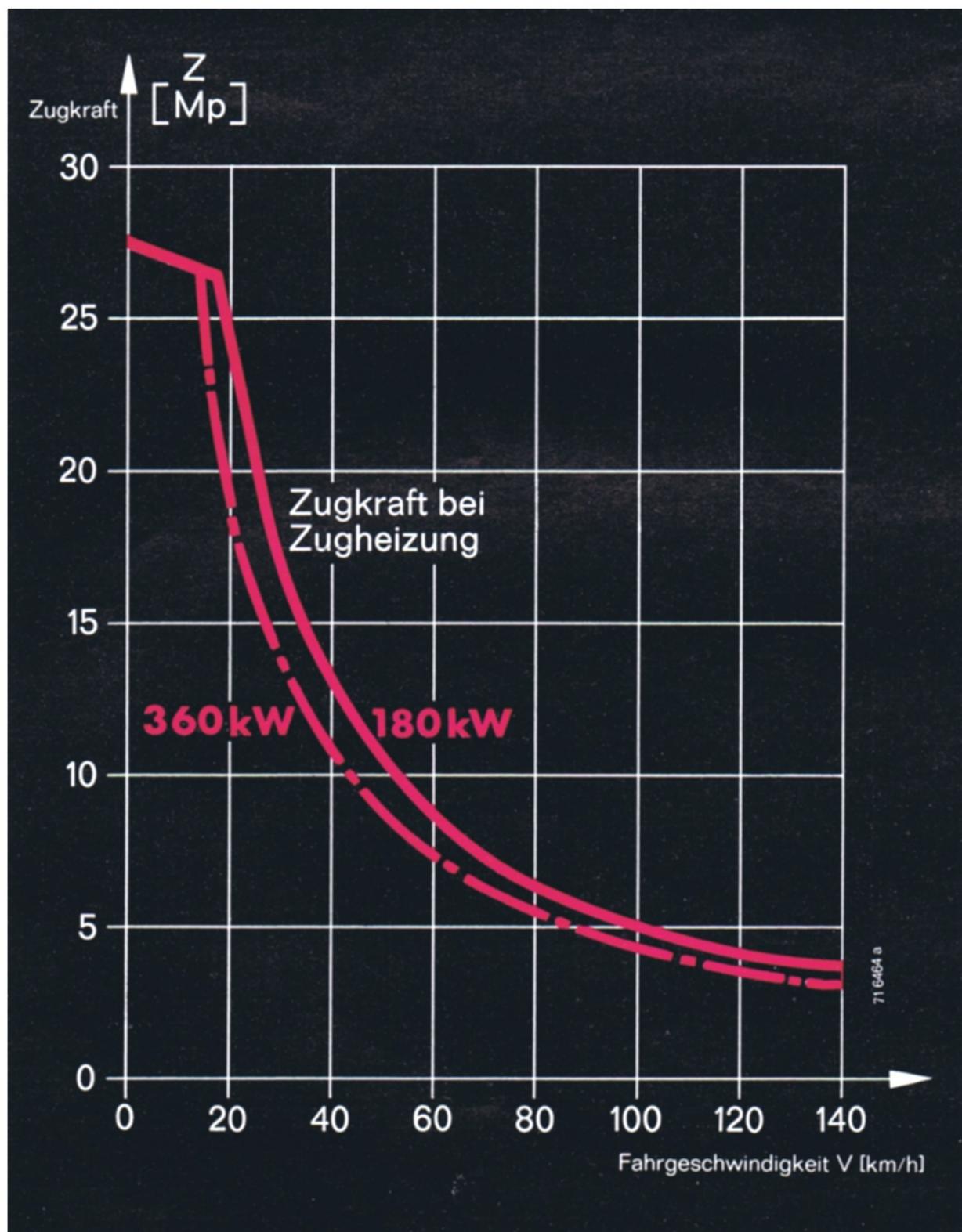
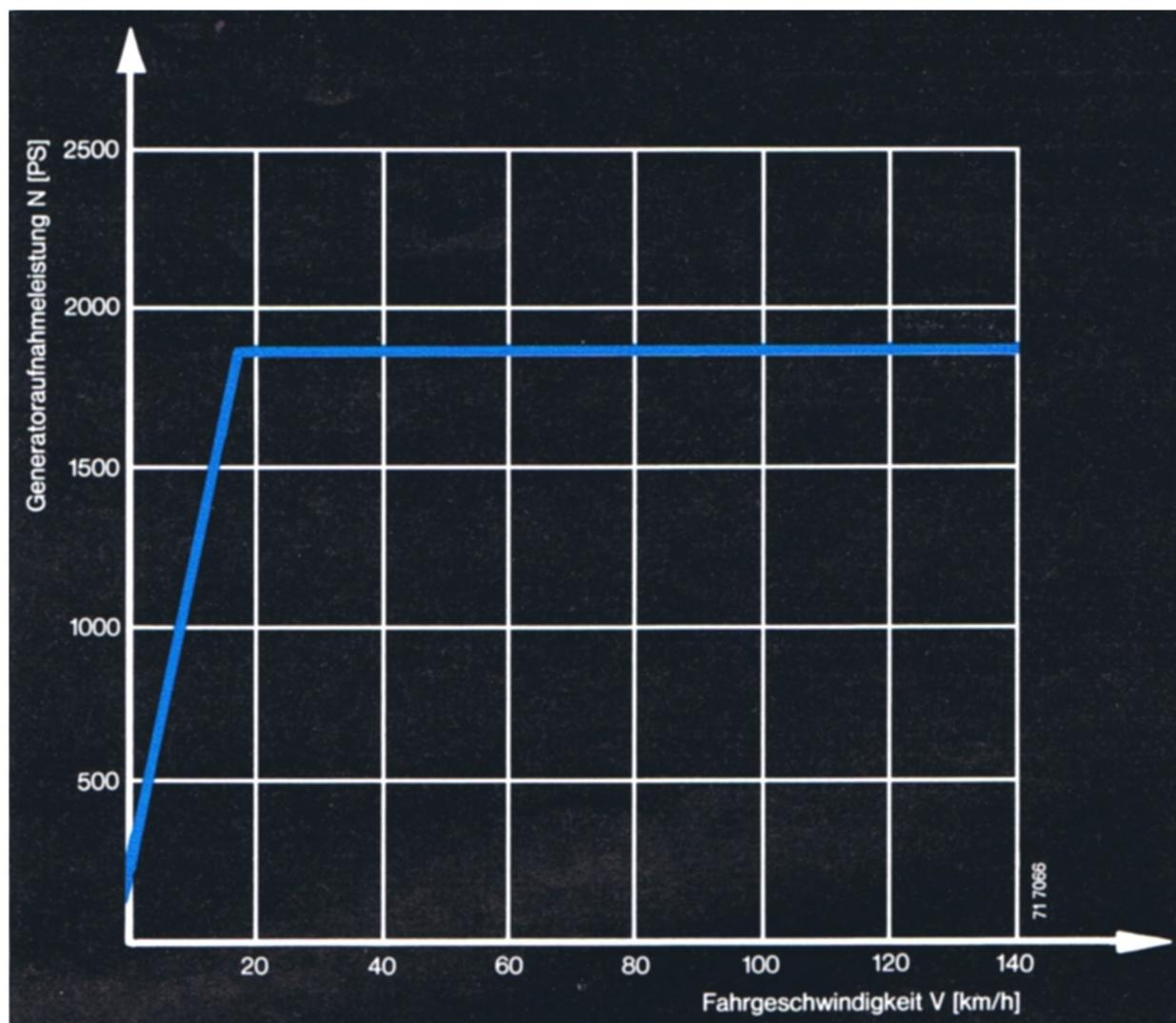


Bild 22: Zugkraftverlauf als Funktion der Fahrgeschwindigkeit.

Bild 23: Aufgenommene Generatorleistung (nur Traktionsanteil) als Funktion der Fahrgeschwindigkeit zum Erreichen der Z-V-Kennlinie nach Bild 22 (ausgezogene Kurve).



membrane auf das Endlager des Dieselmotors ab. Das zweite Wellenende des Generators treibt den sogenannten Zentrallüfter und die Lichtanlaßmaschine mit Kompressor an. Bild 20 zeigt den optimierten Synchrongenerator für die DE 2500.

### 5. Zusammenarbeit von Dieselmotor und Leistungsübertragung

Ein Hauptvorteil der herkömmlichen elektrischen Kraftübertragung besteht in der freien Wahl der Belastungskennlinie für den Dieselmotor. Der Dieselmotor-Hersteller kann die Belastungskennlinie seines Motors bestimmen und je nach Bedeutung den geringsten Brennstoffverbrauch oder den geringsten Verschleiß vorziehen. Auch die Drehstrom-Leistungsübertragung erlaubt diese freizügige Wahl. Die Regelung entspricht dem bekannten Verfahren der BBC-Servofeldregelung [4], d. h. der Dieselmotor selbst bestimmt über sein Füllungsgestänge, welche Leistung am Radumfang abgegeben wird. Ist zum Beispiel ein Zylinder ausgefallen, so müßten die übrigen Zylinder die Leistung durch Übernahme einer zusätzlichen Last erbringen, es müßte also mehr Brennstoff eingespritzt werden.

Diese Abweichung vom Normalzustand wird zur Einleitung eines Signales „weniger Leistung“ für die Leistungsübertragung verwendet. Diese wird solange veranlaßt, weniger Leistung an den Radumfang abzugeben, bis der Dieselmotor wieder mit seiner Sollfüllung auskommt. Nach dem gleichen Grundsatz laufen die Steuerbefehle bei Vergrößerung des Streckenwiderstandes ab. Wird dagegen weniger Leistung benötigt, z. B. beim Befahren einer Gefällestrecke oder beim Abschalten von Hilfsbetrieben (Kühlanlage, elektrische Heizung und dgl.), könnte der Dieselmotor durch geringere Füllung diesem Zustand

folgen. Diese Abweichung wiederum wird dazu benutzt, der Leistungsübertragung das Signal „mehr Leistung“ zu geben, so daß die Lokomotive beschleunigt.

Bei der herkömmlichen Gleichstrom-Leistungsübertragung wird die Leistungsabgabe durch die Spannung des Hauptgenerators geregelt, bei der Drehstrom-Leistungsübertragung übernimmt die Frequenzregelung diese Aufgabe. Wird eine höhere Leistung verlangt, so ist das Signal „Frequenz höher“ zu geben; soll die Leistungsabgabe dagegen kleiner werden, ist eine Verringerung der Frequenz nötig. Bild 21 zeigt das Steuerschema der Drehstrom-Leistungsübertragung.

Das vom Dieselmotor abhängige Steuersystem ist natürlich nur dann im Eingriff, wenn die eingestellte Dieselmotorleistung tatsächlich abgegeben werden kann. Im Anfahrbereich, wo die bereitstehende Leistung nicht abgenommen werden kann, wird eine andere Regelung verwendet. Sie betrifft nur die elektrischen Funktionen, wie Strom, Spannung und größten Schlupf. Ist die eingestellte Dieselmotorleistung erreicht, übernimmt die obenstehende Regelung übergeordnet alle Aufgaben für die motorge-rechte Leistungsregelung.

### 6. Z-V-Kennlinie, Leistungsaufnahme

Die Kennlinien (Bild 22) zeigen den bekannten Verlauf der Zugkraft über der Fahrgeschwindigkeit bei eingeschalteter Zugheizung (180 kW, 360 kW). Bei abgeschalteter Zugheizung liegen die Zugkräfte entsprechend höher. Die größte Zugkraft ergibt sich aus dem Lokomotivgewicht von etwa 80 t und einem Haftwert von 0,33. Die größte Zugkraft von 27 Mp kann gleichzeitig als Dauerwert zugelassen werden, d. h. die kleinste Dauergeschwindigkeit

ist der Stillstand. Dies ist ein weiterer Vorteil der Drehstrom-Leistungsübertragung, der bisher nur bei entsprechenden Kühlanlagen der hydraulischen Leistungsübertragung vorbehalten war, wobei bei der Drehstrom-Leistungsübertragung äußerst geringe Verluste auftreten. Aus Bild 23 ist dies deutlich zu erkennen. Zum Aufbringen der vollen Anfahrzugkraft im Stillstand werden lediglich 200–250 PS benötigt. Die Leistungsaufnahme steigt etwa dem Verlauf der Leistungsabgabe folgend, bis dann beim Übergang auf den Bereich gleichbleibender Leistung 100 % erreicht sind. Die geringen Verluste der Drehstrom-Leistungsübertragung bewirken, daß vom Dieselmotor nicht viel mehr als die jeweilige Anfahrleistung verlangt wird. Das Vergleichen von Wirkungsgradkennlinien verschiedener Systeme hat wenig Sinn, denn bei allen Systemen geht der Wirkungsgradverlauf bei der Geschwindigkeit 0 ebenfalls von 0 aus. Äußerst wichtig ist es z. B. für diesen Fall, zu wissen, mit welchem Wert, d. h. mit welcher Aufnahmeleistung, dieser Wirkungsgrad 0 zu multiplizieren ist. In der Drehstrom-Leistungsübertragung sind also „nur“ 200 bis 250 PS mit 0 zu multiplizieren. Es wäre wesentlich vorteilhafter, allgemein nicht den Wirkungsgrad zu Vergleichszwecken heranzuziehen, sondern die Verlustleistung

als Funktion der Fahrgeschwindigkeit, denn bei dieser Kennlinie ist die Aufnahmeleistung mitberücksichtigt.

## 7. Elektrische Bremse

Bild 24 zeigt den Verlauf der Bremskraft als Funktion der Fahrgeschwindigkeit. Grundsätzlich ist es bei der Drehstrom-Leistungsübertragung auch möglich, die volle Bremskraft, z. B. von 18 Mp, bis zum Stillstand zu erreichen. Allerdings ist hierfür mit fallender Geschwindigkeit eine steigende Zufuhr von Zusatzenergie notwendig. Hier ist eine Technik gegeben, mit der alle besonderen betrieblichen Forderungen erfüllt werden können. Die Erreichung einer Bremskraft von etwa 8 Mp unterhalb 8 km/h Geschwindigkeit bis zum Stillstand erfordert ebenfalls bereits eine Zufuhr von Zusatzenergie, die dem Dieselmotor entnommen wird.

Der Aufwand für die elektrische Bremse ist äußerst gering. Diese besteht im wesentlichen nur aus dem Bremswiderstand und einem Schütz zum Einschalten des Widerstandes. Der Bremswiderstand ist am Gleichstrom-Zwischenkreis angeschlossen und vernichtet die dort anfallende Energie. Zum Einleiten der Bremsung muß kurzzeitig dem Dieselmotor Leistung entnommen werden.

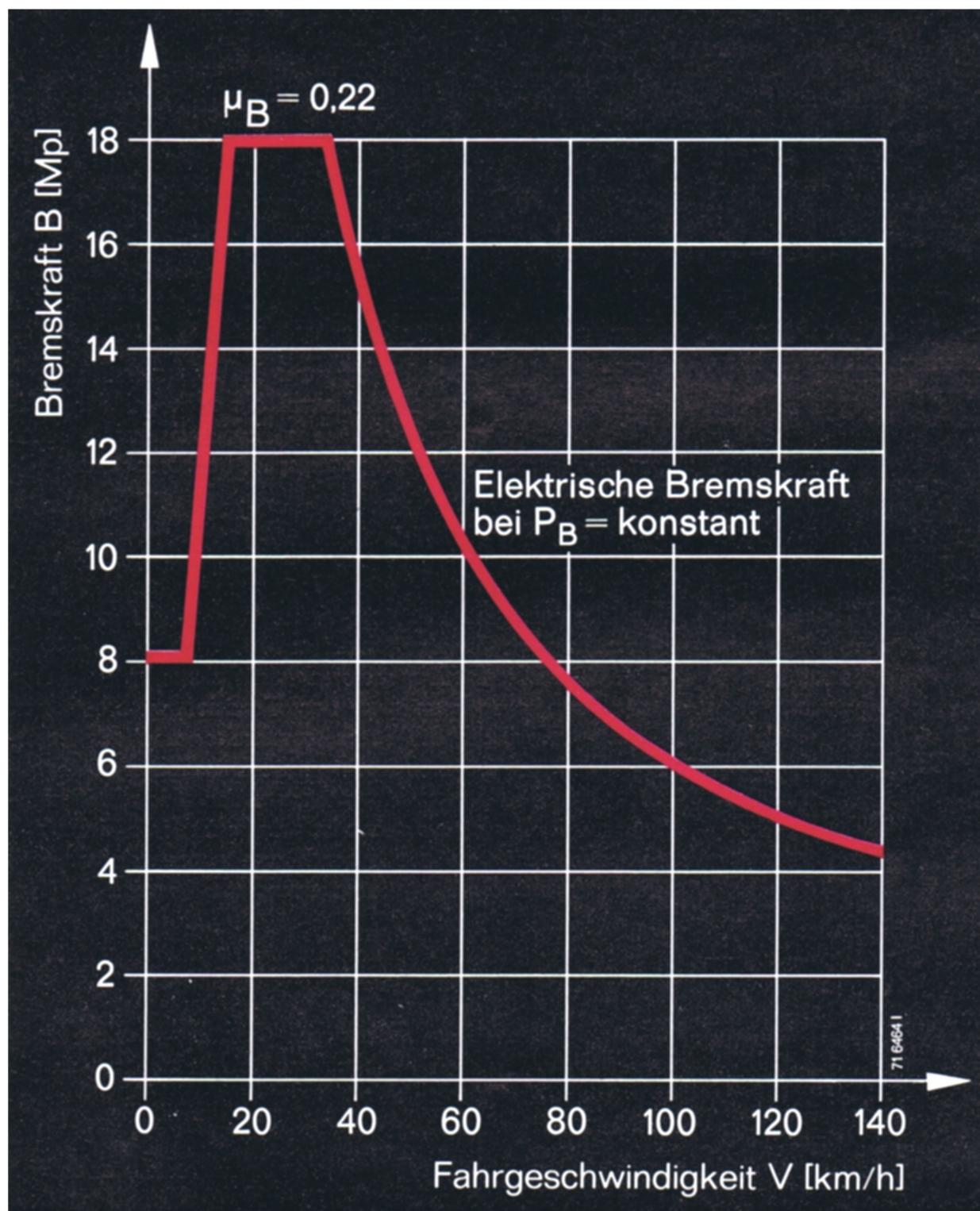
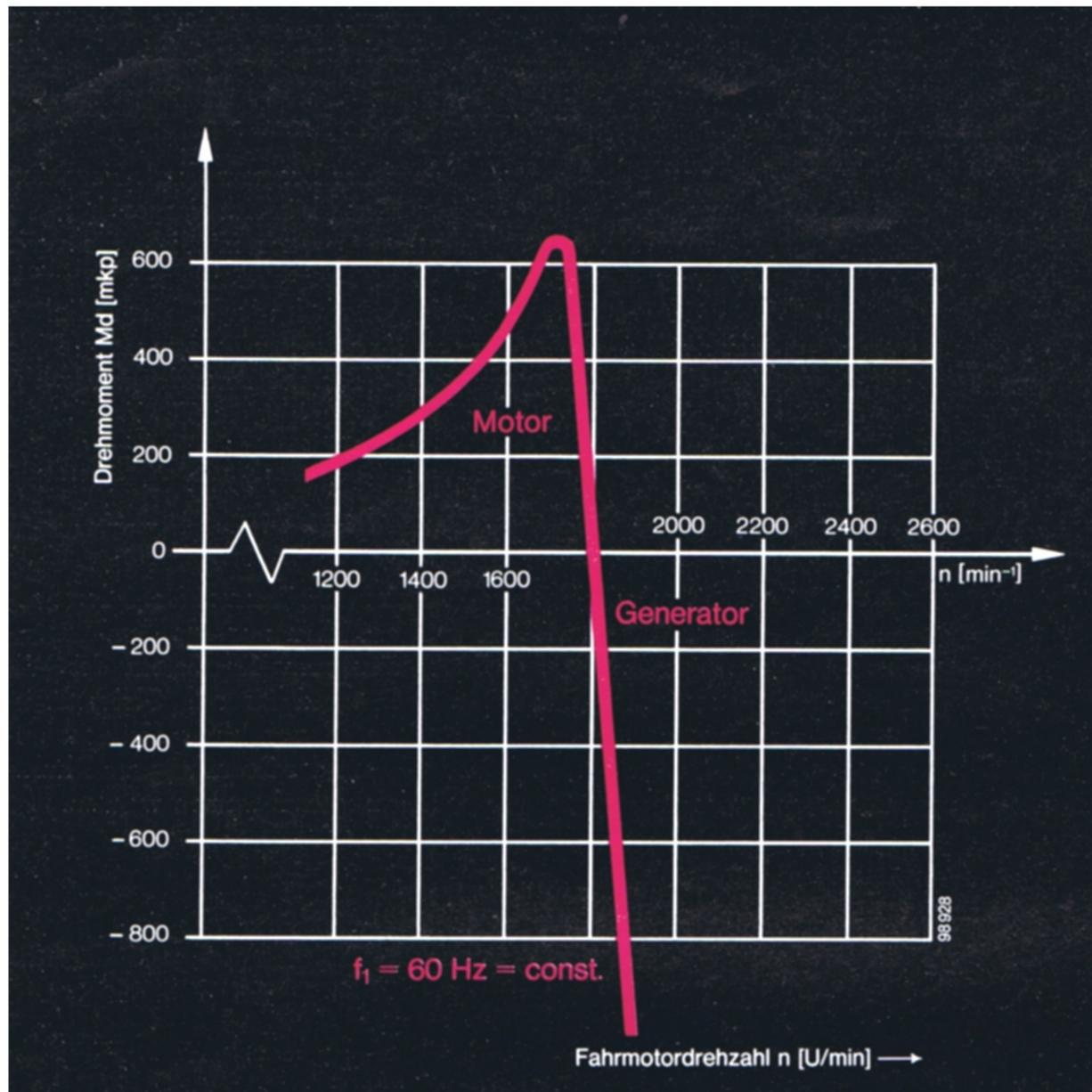


Bild 24: Bremskraftverlauf als Funktion der Fahrgeschwindigkeit.

Bild 25: Drehmoment- und Drehzahlverlauf des Asynchronmotors im motorischen und generatorischen Bereich.



Nach Aufbau der generatorischen Funktion des Asynchronmotors benötigt das System keine Zusatzenergie mehr. Zum Aufbau der generatorischen Funktion kann auch das Bordnetz über eine entsprechende Hochtransformation herangezogen werden. Die einfachste Schaltung ist jedoch über den Dieselmotor gegeben. Unterschiedliche Bremskräfte werden durch Veränderung der Zwischenkreisspannung erzielt. Die im Bremswiderstand umgesetzte Leistung ist abhängig vom Quadrat der Spannung.

Die Nennleistung der elektrischen Widerstandsbremse beträgt 1 800 kW.

Im Bremsbetrieb wird der Asynchronmotor übersynchron eingesetzt, d. h. die mechanische Läuferfrequenz ist höher als die elektrische Frequenz im angeschlossenen Netz. Im Fahrbetrieb liegen die Verhältnisse umgekehrt. Im Bild 25 sind die Betriebsarten dargestellt. Die elektronische Regelung sorgt für die Einhaltung der richtigen Frequenz im Netz.

### 8. Hauptabmessungen

Im Abschnitt „Lokomotivtechnische Gesichtspunkte“ — sind bereits allgemeine Angaben gemacht. Die Lokomotive kann mit dem gleichen Kastenaufbau sowohl zwei- wie auch dreiachsige Drehgestelle erhalten. Bild 1 zeigt, wie sich die Radstände in beiden Ausführungen ändern. Der Abstand zwischen den äußeren Achsen bleibt mit 13 600 mm erhalten. Insgesamt ist der Grundsatz, möglichst gleiche Teile für die verschiedensten Anforderungen zu verwenden, beibehalten. Auch aus Bild 7 ist ersichtlich, wie aufgrund der

gleichen Fahrmotorquerschnitte die Drehgestelle in vielen Einzelheiten gleich ausgeführt werden können.

Die Achslagerung, Lenker und Fahrmotoraufhängung sind sowohl bei der zweiachsigen als auch bei der dreiachsigen Ausführung gleich. Die Zugänglichkeit zu den einzelnen Teilen des Drehgestelles ist hervorragend.

### 9. Hilfseinrichtungen

Der erste Prototyp ist zur Versorgung der durchgehenden Zugsammelschiene mit einem Wechselrichter ausgerüstet. Dessen Leistung beträgt 400 kVA bei 1 000 V,  $16\frac{2}{3}$  Hz. Dieser Heizwechselrichter ist aus den gleichen Bausteinen aufgebaut wie der Traktionswechselrichter. Nahezu alle Teile des Starkstromkreises und des Steuerkreises sind mit den entsprechenden Teilen des Traktionswechselrichters gleich und tauschbar. Für die Versorgung des Heizwechselrichters ist kein besonderer Generator notwendig. Er wird durch den Hauptgenerator und durch die anschließende Gleichstromsammelschiene gespeist.

Die Frequenz ist beim ersten Prototyp auf  $16\frac{2}{3}$  Hz eingestellt. Sie kann ohne weiteres z. B. auf 22 Hz oder 50 Hz verändert werden.

Für die Kühlung des Heizwechselrichters wird ein elektrisch angetriebener Lüfter verwendet, der ebenso wie die Lüfter des Traktionswechselrichters durch den Hauptgenerator versorgt wird.

In vielen Versuchsreihen wurde der Parallelbetrieb von Traktionswechselrichter und Heizwechselrichter geprüft.

Wird keine Energieversorgung für die Heizung, wie z. B. im Güterzugdienst, benötigt, geht die freiwerdende Energie automatisch in den Traktionswechselrichter.

Für den Einsatz bei der Deutschen Bundesbahn sind alle

vorgeschriebenen Sicherheitseinrichtungen, wie Indusi und Sifa, eingebaut.

Die Beschreibung weiterer Hilfseinrichtungen würde den Rahmen sprengen. Diese sollen in naher Zukunft unter Darstellung von Einzelheiten erläutert werden.

## Zusammenfassung

Die sich durch ein geringes Leistungsgewicht auszeichnenden Diesellokomotiven mit hydraulischer Leistungsübertragung, die von der DB in größerer Zahl, von ausländischen Eisenbahnverwaltungen in bescheidenerem Umfang eingesetzt wurden, vermochten sich trotz ihrer Vorzüge auf dem Weltmarkt gegen die Diesellokomotiven mit elektrischer Leistungsübertragung nicht durchzusetzen. Diese Erfahrungen führten zum Entwurf und Bau einer Lokomotive mit Asynchronmotoren nach einem Baukastengrundsatz, auf Grund dessen die vielfältigen Forderungen der Kundschaft im Hinblick auf Spurweite, Umgrenzungsmaße und Achslast erfüllt werden können. Die von BBC entwickelte Drehstrom-Leistungsübertragung vereinigt die wesentlichen Vorteile der hydraulischen und herkömmlichen elektrischen Leistungsübertragung: geringes Gewicht, kleine nichtabgefederte Massen, hohe Dauerzugkräfte, geringe Verluste, gute Haftwertausnutzung

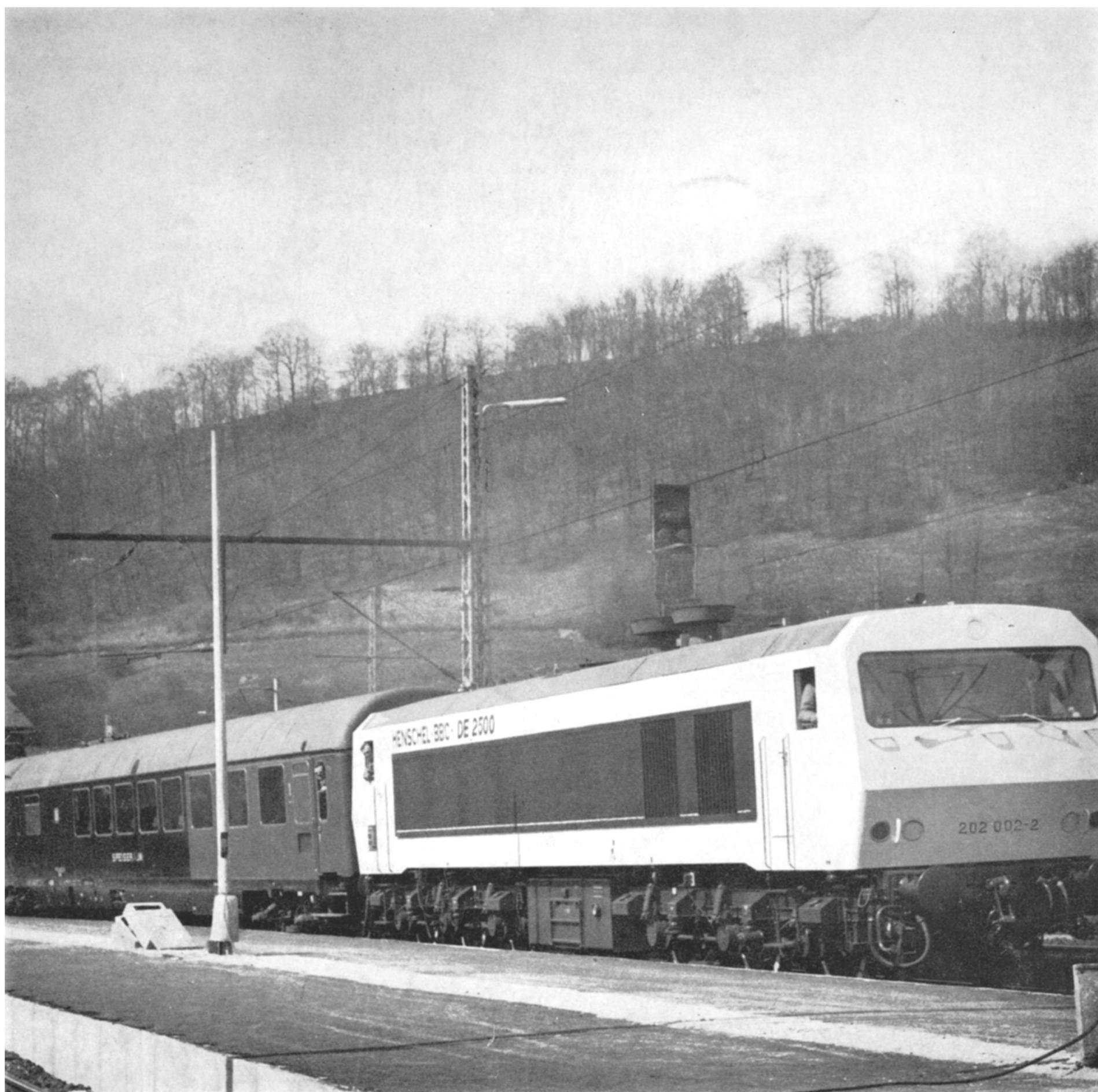
durch elektrische Welle, weitgehend verschleißlose Technik, damit geringer Wartungsaufwand, Freizügigkeit in der Anordnung, keine Blindmomente.

Der erste Prototyp Henschel-BBC-DE 2500 hat bereits viele Probefahrten erfolgreich bestanden. Die Ergebnisse waren so positiv, daß der Bau weiterer Prototypen beschlossen wurde.

### Schrifttum

- [1] Schönung, A. u. H. Stemmler, Geregelter Drehstrom-Umkehrantrieb mit gesteuertem Umrichter nach dem Unterschwingungsverfahren. BBC-Nachrichten 1964, S. 699/721.
- [2] Kämpfe, K. 2000-PS-Diesellokomotive mit elektrischer Leistungsübertragung für eine Erzbahn in Liberia. Glasers Annalen 1966, 6, S. 195/207.
- [3] Teich, W. Die elektrische Kraftübertragung in Bahnfahrzeugen mit Dieselantrieb. BBC-Nachrichten 1969, Okt., S. 565/568.
- [4] Whitwell, G. A. The Brown Boveri Servo-Field-Regulator. Brown Boveri-Druckschrift 1954, 2374 E-XI. 10 (11.54) L 2044.

# HENSCHEL-BBC-DE 2500



**RHEINSTAHL  
Transporttechnik**

HENSCHEL Lokomotiven  
35 Kassel 2 Postfach 786

**BBC**  
BROWN BOVERI

BROWN, BOVERI & CIE · AKTIENGESELLSCHAFT · MANNHEIM  
6800 Mannheim 1 · Postfach 351