

# 1 Bahnenergieversorgung

## 1.0 Symbole und Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
ADIF	Administrador de Infraestructuras Ferroviarias	–
AES	Automatisches Erdungssystem	–
AGP	Abzweiggebundene Prüfung	–
AT	Autotransformator	–
ATS	Autotransformatorenstationen	–
AWE	Automatische Wieder-Einschaltung	–
Bf	Bahnhof	–
BBS	Betriebssammelschiene	–
BUW	Blockunterwerk	–
DCF77	Deutscher Langwellensender bei Frankfurt mit der Trägerfrequenz 77,5 kHz	–
DZÜ	digitale Zählerstandsübertragung	–
EL-Signale	Fahrleitungssignale am Gleis, die den elektrischen Betrieb regeln	–
FM	Feldmodul	–
FWM	Fernwirkmodul	–
Gkw	Gemeinschaftskraftwerk	–
GS	Synchrongenerator	–
GR	Gleichrichter	–
HSL	Hauptschaltleitung	–
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode)	–
KRITIS	Kritische Infrastrukturen gemäß §2 BSI-Gesetz	–
KS	Kurzschließer	–
Ks	Kuppelstelle	–
Kw	Kraftwerk	–
LCU	Local Control Unit (Lokale Steuereinheit)	–
L1 (2,3)	Außenleiter	–
$M$	Drehmoment	kNm
MMDC	Modular Multilevel Direct Converter (Multilevel-Direktumrichter)	–
MS	Synchronmotor	–
NF	Negative Feeder (negativer Speiseleiter)	–
NSS	Nullschienenschrank	–
OL	Oberleitung	–
OLPA	Oberleitungs-Prüfautomatik	–
OLRA	Oberleitungs-Rückspannungsprüfautomatik	–
OLSP	Oberleitungs-Spannungsprüfung	–
OLWA	Oberleitungs-Wiedereinschaltautomatik	–
ÖBB	Österreichische Bundesbahn	–
$P$	Leistung	kW
PF	Positiv Feeder (positiver Speiseleiter)	–
PSG	Parallelschaltgerät	–
PSS	Prüfsammelschiene	–
PWR	Pulsleichrichter	–
RSS	Regelschutzstrecke	–
RSSA	Regelschutzstreckenautomatik	–
$S''_K$	Kurzschlussleistung des Drehstromnetzes	MVA

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$S_I$	Traktionsleistung	MVA
SBB	Schweizerische Bundesbahnen	–
SBS	Schaltbefehlsstelle	–
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Überwachung, Steuerung und Datenerfassung)	–
SCD	Short-Circuiting Device (Kurzschließenrichtung)	–
SLT	Stationsleittechnik	–
Sp	Schaltposten	–
Sw	Schaltwerk	–
$U_i$	inverse Spannung	kV
$U_{\max 1}$	höchste Dauerspannung	V
$U_{\max 2}$	höchste nicht permanente Spannung	V
$U_{\max 3}$	Überspannungsspitze	V
$U_{\min 1}$	niedrigste Dauerspannung	V
$U_{\min 2}$	niedrigste nicht permanente Spannung	V
$U_n$	Nennspannung	kV
Uw	Unterwerk, Umspannwerk	–
VPN	Virtual Privat Network	–
WAN	Wide Area Network	–
Zes	Zentralschaltstelle	–
$di/dr$	Anstiegsgeschwindigkeit des Stromes	A/s
dUfw	dezentrales Umformerwerk	–
dUrw	dezentrales Umrichterwerk	–
$f$	Frequenz	Hz
$n$	Drehzahl	1/s, 1/min
$n_u$	Vielfaches der Nennspannung	–
$p$	Polpaarzahl	–
$u_U$	Spannungsunsymmetrie	%
zUfw	Zentrales Umformerwerk	–
zUrw	Zentrales Umrichterwerk	–
4QS	Vierquadrantensteller	–

## 1.1 Aufgaben der Bahnenergieversorgung

Elektrische Bahnen haben die Aufgabe, Personen und Güter mit Hilfe elektrischer Energie wirtschaftlich und umweltfreundlich zu transportieren. Im Hochgeschwindigkeitsbereich und im städtischen Nahverkehr sind elektrisch angetriebene Züge praktisch alternativlos. Die *Bahnenergieversorgung* soll den zuverlässigen Bahnbetrieb mit *elektrischen Zügen* ermöglichen und umfasst dabei die Gesamtheit der ortsfesten Einrichtungen der elektrischen Traktion [1.1, 1.2]. Die Bahnenergieversorgung lässt sich in *Erzeugung, Übertragung und Verteilung der Bahnenergie* auf elektrische Triebfahrzeuge unterteilen. Die Speisung mobiler Verbraucher über Fahrleitungen stellt den wesentlichen Unterschied zum öffentlichen Stromversorgungsnetz dar. Die Bahnenergie wird entweder durch bahneigene Kraftwerke erzeugt oder vom öffentlichen Netz bezogen. Wird die Energie durch das öffentliche Netz bezogen, muss eine Umrichtung oder Umformung stattfinden. Die Verteilung dieser Energie findet in bahneigenen zentralen Netzen statt. Von dort wird die Energie über Unterwerke in die Fahrleitung gespeist. Weiter kann auch vom öffentlichen Netz die Energie über dezentrale Umformer- und Umrichterwerke direkt in die Fahrleitung gespeist werden. Dieses Buch behandelt vorwiegend die *Fahrleitungen*, die einen Teil der *Bahnenergieversorgung* und einen Oberbegriff für Oberleitungen, Dritte Schienen, Stromschienen-Oberleitungen und Sonderfahrleitungen darstellen.

Um die Anforderungen eines zuverlässigen elektrischen Betriebs zu erfüllen, müssen Fahrleitungen

- die für die Traktion erforderliche Leistung am Stromabnehmer der Triebfahrzeuge ununterbrochen bereitstellen,
- anfallende Bremsenergie aufnehmen,

- die Spannungsqualität an den Stromabnehmern der elektrischen Triebfahrzeuge entsprechend den Normvorgaben einhalten.

Die *Bahnbelastung* unterscheidet sich von der Belastung in öffentlichen Energieversorgungen, weil sie ortsveränderlich und sehr zeitabhängig ist.

## 1.2 Bahnstromarten

Der Begriff *Stromart* wird allgemein verwendet, um die verschiedenen Arten der elektrischen Energieversorgung für die Traktion zu unterscheiden. Die ersten elektrifizierten Bahnen verwendeten Gleichstrom für die Zugförderung (siehe Kapitel 3). Grund hierfür war die für Bahnantriebe günstige hyperbolische Zugkraft-Geschwindigkeits-Charakteristik des Reihenschlusskommutatormotors. Deswegen sind weltweit auch heute noch fast ein Drittel aller elektrischen Bahnen Gleichstrombahnen. Nachteil der Gleichstromspeisung sind die wegen der aufwändigen Transformierbarkeit niedrigen Nennspannungen und die daraus resultierenden großen Ströme zum Übertragen der erforderlichen Traktionsleistungen.

Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts begannen daher erste Versuche, die Vorteile des Reihenschlussmotors mit der Transformierbarkeit des Wechselstromes zu verknüpfen. Ziel war es, einen Reihenschlussmotor als Antriebsmaschine zu verwenden, der mit Einphasenwechselstrom der Landesnetzfrequenz, in Deutschland und in Mitteleuropa 50 Hz, gespeist werden sollte. Bedingt durch den damaligen technischen Entwicklungsstand ließen sich einige Probleme bei der Nutzung des 50-Hz-Einphasenwechselreihenschlussmotors wie

- enormer Kommutatorverschleiß des 50-Hz-Einphasenreihenschlussmotors durch eine transformatorische Spannung in der eingängigen Schleifenwicklung,
- hohe induktive Beeinflussungen der zur elektrischen Bahn parallel verlaufenden Leitungen,
- unverträglich große Werte der Spannungsunsymmetrie im speisenden 50-Hz-Drehstromnetz durch die einphasige Entnahme der Bahnleistung

nicht ausräumen. Mannigfaltige Bemühungen führten deswegen in Deutschland und einigen Nachbarländern zu der Stromart *Einphasenwechselstrom* mit der Frequenz  $50\text{ Hz}/3 = 16\frac{2}{3}\text{ Hz}$ , wobei die Elektroenergie einphasig in einem eigenen Bahnnetz erzeugt und übertragen wurde. Drei deutsche Länder führten diese Bahnstromart 1912/1913 ein [1.1, 1.3], die auch später von den anderen deutschen Ländern übernommen wurde. Unabhängig davon führten Entwicklungen in Österreich, Schweiz, Norwegen und Schweden zum gleichen Ergebnis. Die  $16\frac{2}{3}\text{-Hz-Einphasenwechselstrom}$  hat sich auch für die Energieversorgung des elektrischen Hochgeschwindigkeits- und Hochleistungsverkehrs als besonders leistungsfähig und effektiv erwiesen, da sie zentral gespeiste Netze mit durchgeschalteten Oberleitungen ermöglicht. Im Jahr 2000 legten die österreichischen, die deutschen und die Schweizer Eisenbahnen die Sollfrequenz auf  $16,7\text{ Hz}$  [1.4]–[1.6] fest. Seither verwenden einige Normen wie EN 50163 und EN 50388 diesen Wert zur Bezeichnung der Nennfrequenz. Daher

**Tabelle 1.1:** Nennspannungen und ihre betrieblichen Grenzen für elektrische Bahnen gemäß EN 50163.

Stromart	$U_{\min 2}$ V	$U_{\min 1}$ V	$U_n$ V	$U_{\max 1}$ V	$U_{\max 2}$ V	$U_{\max 3}$ V
DC 600 V		400	600	720	800	–
DC 750 V		500	750	900	1 000	1 270
DC 1,5 kV		1 000	1 500	1 800	1 950	2 540
DC 3,0 kV		2 000	3 000	3 600	3 900	5 075
AC 15 kV 16,7 Hz	11 000	12 000	15 000	17 250	18 000	24 300
AC 25 kV 50 Hz	17 500	19 000	25 000	27 500	29 000	38 750

$U_n$  Nennspannung

$U_{\min 1}$  niedrigste Dauerspannung

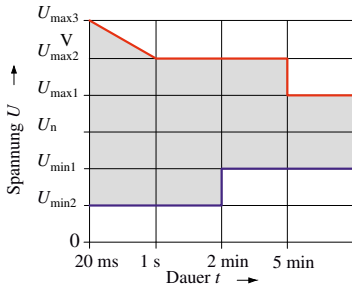
$U_{\min 2}$  niedrigste nicht-permanente Spannung, darf während maximal 2 min auftreten

$U_{\max 1}$  höchste Dauerspannung

$U_{\max 2}$  höchste nicht-permanente Spannung, darf während maximal 5 min auftreten

$U_{\max 3}$  Überspannungsspitze, die während maximal 20 ms auftreten darf und nach 1 s auf

$U_{\max 2}$  abgeklungen sein muss (siehe Bild 1.1)



**Bild 1.1:** Minimale und maximale Werte der Spannung  $U$  entsprechend ihrer Dauer  $t$  nach EN 50163.

wird im Folgenden die Frequenz 16,7 Hz für die Bezeichnung der in Mittel- und Nordeuropa gebräuchlichen Stromart verwendet.

Erste Erfahrungen mit Bahnstrom AC 25 kV 50 Hz wurden in den vierziger Jahren bei der Höllentalbahn gewonnen [1.7] und führten dank des schnellen Fortschritts auf dem Gebiet der Leistungselektronik zur bevorzugten Nutzung dieser Stromart in Ländern, die mit der Elektrifizierung ihrer Bahnen später begannen. Bei Ländern mit Landesfrequenz 60 Hz gilt Entsprechendes.

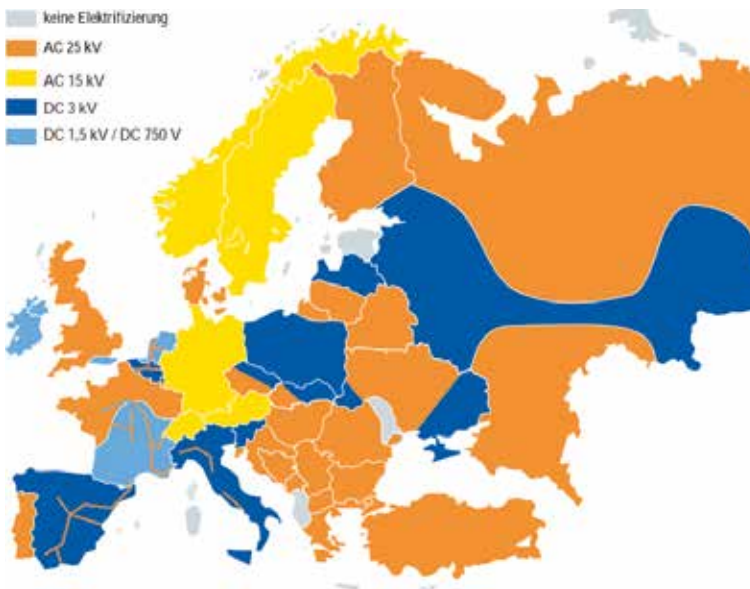
Die am häufigsten verwendeten Stromarten sind:

- Gleichstrom mit 0,6 kV, 0,75 kV, 1,5 kV und 3 kV
- Wechselstrom 16,7 Hz mit 15 kV
- Wechselstrom 50 Hz mit 25 kV

Tabelle 1.1 zeigt die Nennspannungen zusammen mit ihren betrieblichen Grenzen. Unter Betriebsbedingungen dürfen die Spannungen an den Stromabnehmern zwischen  $U_{\min 1}$  und  $U_{\max 2}$  schwanken. Spannungen zwischen  $U_{\min 1}$  und  $U_{\min 2}$  dürfen nicht länger als zwei Minuten und Spannungen zwischen  $U_{\max 1}$  und  $U_{\max 2}$  nicht länger als fünf Minuten anstehen.

Bild 1.2 und Tabelle 1.2 zeigen Bahnstromarten der Fern- und Regionalbahnen der europäischen Länder.

Nach den in [1.9] veröffentlichten Statistiken wurden am Jahresende 2020 weltweit rund 380 000 km elektrisch betrieben, deren Streckenanteile der Tabelle 1.3 zu entnehmen sind.



**Bild 1.2:** Übersicht über Bahnstromarten für Vollbahnen in Europa. In einzelnen Ländern sind Abweichungen möglich

**Tabelle 1.2:** Stromarten europäischer elektrischer Fern- und Regionalbahnen in Streckenkilometer.

Land	DC			AC			Gesamt	Quelle
	1,5 kV	3,0 kV	Andere	15 kV 16,7 Hz	25 kV 50 Hz	Andere		
Albanien	0	0	0	0	0	0	0	[1.9]
Aserbaidschan	0	1 238	0	0	0	0	1 238	[1.9]
Belgien	0	2 647	0	0	303	0	2 950	[1.8]
Bosnien-H.	0	0	0	0	306	0	306	[1.9]
Bulgarien	0	0	0	0	2 880	0	2 880	[1.9]
Dänemark	172	0	0	0	454	0	626	[1.9]
Deutschland	0	0	410	19 691	0	0	20 101	[1.9]
Estland	0	133	0	0	0	0	133	[1.9]
Finnland	0	0	0	0	3 172	0	3 172	[1.9]
Frankreich	5 863	0	63	59	9 698	0	15 683	[1.9]
Georgien	37	0	1 251	0	0	0	1 288	[1.9]
Griechenland	0	0	0	0	595	0	595	[1.9]
Großbritannien	19	0	2 014	0	3 345	0	5 378	[1.9]
Irland	49	0	0	0	0	0	49	[1.9]
Island	0	0	0	0	0	0	0	[1.9]
Italien	181	12 018	32	0	407	0	12 638	[1.9]
Kasachstan	0	0	0	0	4 056	0	4 056	[1.9]
Kroatien	0	0	0	0	985	0	985	[1.9]
Lettland	0	0	257	0	0	0	257	[1.9]
Litauen	0	0	0	0	122	0	122	[1.9]
Luxemburg	0	19	0	0	243	0	262	[1.9]
Mazedonien	0	0	0	0	223	0	223	[1.9]
Monaco	0	0	0	0	2	0	2	[1.8]
Montenegro	0	0	0	0	169	0	169	[1.9]
Niederlande	0	0	0	0	291	0	291	[1.8]
Nordmazedonien	0	0	0	0	315	0	315	[1.9]
Norwegen	0	0	0	2 700	0	0	2 700	[1.9]
Österreich	0	0	30	3 526	0	84	3 640	[1.9]
Polen	0	11 799	0	0	0	0	11 799	[1.9]
Portugal	25	0	0	0	1 411	0	1 436	[1.8]
Rumänien	0	0	0	0	4 030	0	4 030	[1.9]
Russland <sup>1)</sup>	0	18 800	0	0	21 500	0	40 300	[1.9]
Schweden	65	0	0	8 189	0	0	8 254	[1.9]
Schweiz	3 817	0	419	842	0	144	5 222	[1.9]
Serbien	0	0	0	0	1 196	0	1 196	[1.9]
Slowakei	42	807	6	2	759	0	1 616	[1.9]
Slowenien	0	1 006	0	0	0	0	1 006	[1.8]
Spanien	746	6 488	186	0	2 406	0	9 826	[1.9]
Tschechien	24	1 764	0	1	1 306	0	3 095	[1.8]
Türkei	0	0	0	0	1 928	0	1 928	[1.9]
Ukraine	0	4 930	0	0	4 320	0	9 250	[1.9]
Ungarn	0	0	0	0	3 060	0	2 858	[1.9]
Weißrussland	0	0	0	0	874	0	874	[1.9]

<sup>1)</sup> einschließlich asiatischer Teil von Russland

Sonstige Bahnstromarten sind DC 0,8 kV; DC 0,85 kV; DC 0,86; DC 0,90 kV; DC 1,0 kV; DC 1,125 kV; DC 1,2 kV; DC 1,25 kV; DC 1,35 kV und DC 3,3 kV, die weltweit 1,5 % Anteil an den elektrifizierten Strecken haben, und AC 11 kV 16,7 Hz; AC 6,5 kV 25 Hz; AC 20 kV 50 Hz; AC 50 kV 50 Hz; AC 20 kV 60 Hz und AC 25 kV 60 Hz, die weltweit 2,0 % Anteil an den elektrifizierten Strecken haben.

Nahverkehrsbahnen nutzen überwiegend DC 600 V, 750 V oder 1 500 V.

Die Systemauswahl und -auslegung von AC- oder DC-Bahnenergieanlagen erfordern umfassende Untersuchungen und Berechnungen auf Grundlage der Strecken-, Fahrzeug- und Betriebsdaten. Sie erstrecken sich auf die elektrische Dimensionierung der Unterwerke und Fahrleitungsanlagen mit:

- Vergleich der Systeme und Varianten
- wirtschaftlicher Auslegung der Anlagen
- Planen von Leistungsreserven für künftige Erweiterungen

**Tabelle 1.3:** Stromarten weltweiter elektrischer Fern- und Regionalbahnen in Streckenkilometer [1.9].

Kontinent		DC			AC			Gesamt
		1,5 kV	3,0 kV	Andere	15 kV 16,7 Hz	25 kV 50 Hz	Andere	
Europa <sup>1)</sup>	km	11 016	58 618	4 691	35 009	63 519	228	173 081
	%	6,4	33,9	2,7	20,2	36,7	0,1	100
Asien, Australien	km	17 368	370	524	0	168 228	5 667	192 158
	%	9,0	0,2	0,3	0,0	87,5	2,9	100
Amerika	km	116	2 085	505	0	275	790	3 771
	%	3,1	55,3	13,4	0,0	7,3	20,9	100
Afrika	km	62	7 148	0	0	3 716	861	11 787
	%	0,4	60,3	0,0	0,0	31,3	8,0	100
Welt	km	28 558	67 581	5 721	35 009	235 405	7 546	379 820
	%	7,5	17,8	1,5	9,2	62,0	2,0	100

<sup>1)</sup> einschließlich asiatischer Teil von Russland

- Berechnung des Energieverbrauchs
- Ermittlung der Errichtungskosten
- Untersuchung der Ausfallszenarien

Zur Auslegung von Bahnenergieanlagen lassen sich Simulationsprogramme wie Sitras Sidytrac verwenden [1.10]. Das Zusammenwirken von Bahnenergieanlage mit den Fahrzeugen kann im Prüf- und Validationscenter in Wegberg-Wildenrath (PCW) der Siemens Mobility GmbH verifiziert werden [1.11]. Dort stehen alle gängigen Bahnstromarten zur Verfügung.

## 1.3 Aufbau der Bahnenergieversorgung

### 1.3.1 Bereitstellung und Übertragung

Im Bild 1.3 ist der Aufbau für die Bahnenergieversorgung dargestellt. DC-Bahnen und AC-50-Hz-Einphasenwechselstrombahnen entnehmen die Bahnenergie dem Landesnetz; AC-15-kV-16,7-Hz-Bahnen erhalten die Bahnenergie aus

- eigenen Kraftwerken und Übertragung mit eigenen Netzen,
- dem öffentlichen Netz gespeisten zentralen Umformer- und Umrichterwerken, die in das bahneigene Übertragungsnetz einspeisen oder
- dem öffentlichen Netz gespeisten dezentralen Umformer- oder Umrichterwerken, die direkt das Fahrleitungsnetz speisen.

Wie aus Bild 1.3 hervorgeht, werden die Unterwerke der Gleichstrombahnen aus Drehstromnetzen mit Nennspannungen zwischen 10 kV und 66 kV gespeist. Gleichstromfernbahnen verwenden überwiegend die Nennspannungen 1,5 kV oder 3 kV. Die weit über hundert AC-110-kV-Teilnetze der öffentlichen Stromversorgung in Deutschland sind in der 110-kV-Ebene nicht miteinander verbunden. Diese Maßnahme begrenzt die Kurzschlussströme und vereinfacht den Schutz der Netze. Die übergeordneten 220-kV- oder 380-kV-Netze verbinden das mit 110 kV Nennspannung betriebene Netz. Daher sind alle 110-kV-Netze über die Verknüpfung mit dem Verbundnetz synchronisiert. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für den Parallelbetrieb der dezentralen Bahnenergieversorgung im Teilnetz der DB.

### 1.3.2 Verteilung und Zuführung

Die *Bahnenergieverteilung* dient der Umwandlung der Energie in geeignete Spannungen und Frequenzen für die elektrische Traktion und der Speisung der Fahrleitungen und der Zuführung zu den Verbrauchern. Nach Bild 1.4 lassen sich unterscheiden:

- *Bahnumspannwerke*, im Umgangssprachgebrauch häufig als *Unterwerke* (Uw) bezeichnet, die die Spannung des Übertragungsnetzes in die Nennspannung des Fahrleitungsnetzes umspannen und in die Fahrleitungen einspeisen.

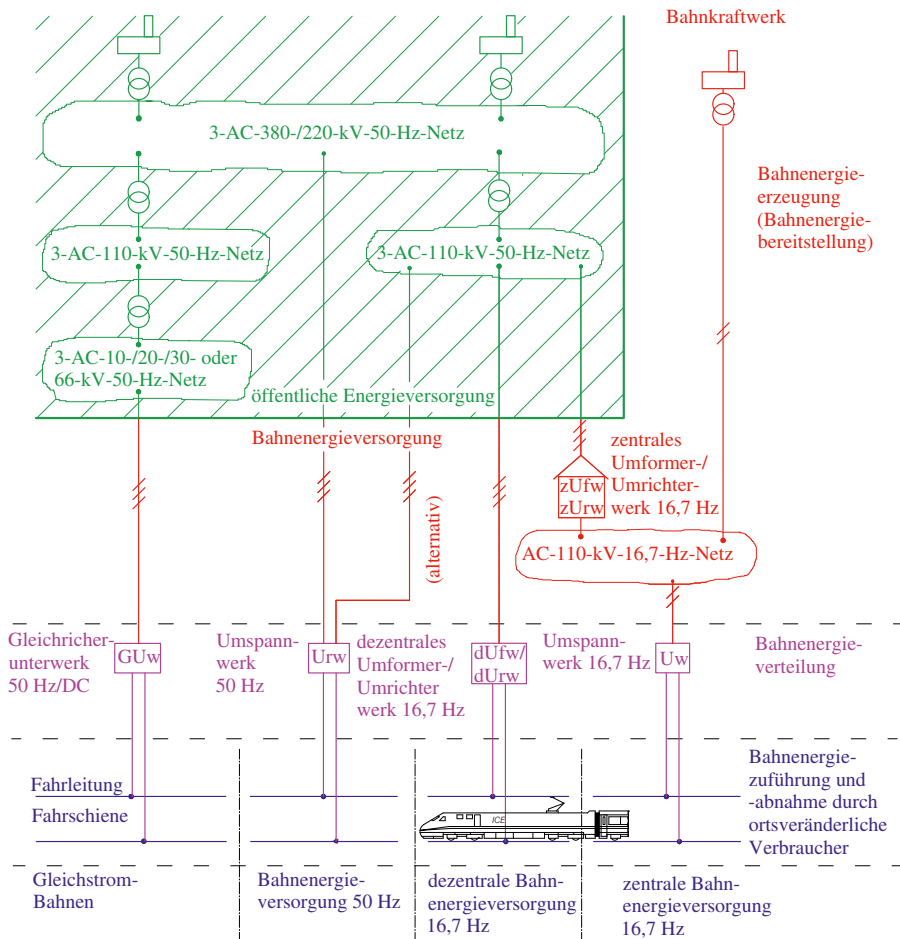


Bild 1.3: Aufbau der Bahnenergieversorgung [1.12].

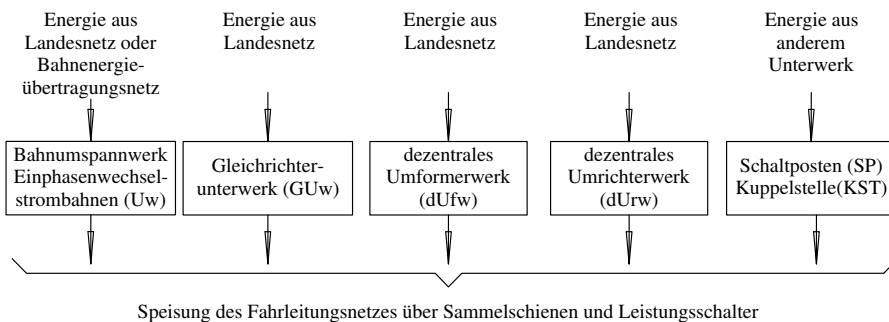
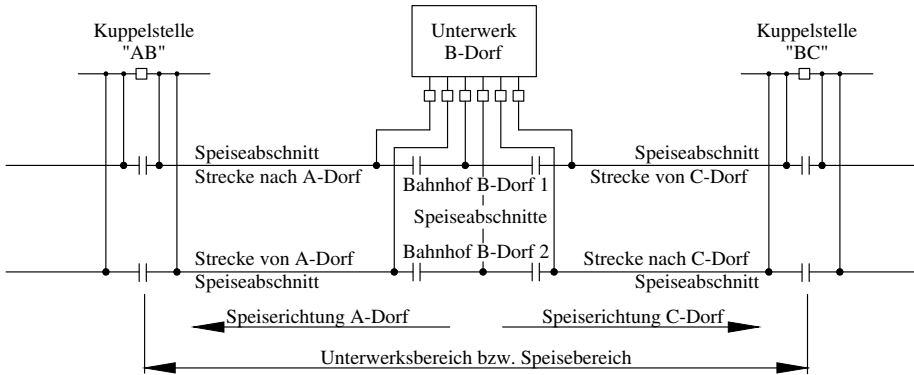


Bild 1.4: Einspeisungen für die Bahnenergieversorgung.



**Bild 1.5:** Energieversorgung eines dezentral gespeisten Unterwerksbereiches bei Vollbahnen.

- *Bahngleichrichterunterwerke* (GUw), die bei Gleichstrombahnen den Drehstrom des Landesnetzes in die Speisespannung des Fahrleitungsnetzes umspannen, gleichrichten und die Fahrleitungen speisen.
- *Dezentrale Umformerwerke* (dUfw), die die dreiphasige Energie des 50-Hz-Landesnetzes mit Hilfe rotierender Maschinen in einphasige Spannung des 16,7-Hz-Bahnnetzes umwandeln und auf die entsprechende Spannung des Oberleitungsnetzes umspannen,
- *Dezentrale, statische Umrichterwerke* (dUrw), die die gleiche Funktion wie dezentrale Umformerwerke haben, aber mit Komponenten der Leistungselektronik anstelle der rotierenden Maschinen ausgerüstet sind,
- Schaltposten und *Kuppelstellen* verwenden einen oder mehrere Leistungsschalter, um die Längs- und Querkupplung der Fahrleitungsabschnitte herzustellen und so die Spannungsfälle und Verluste im Fahrleitungsnetz zu verkleinern. Über die Fahrleitung verbinden sie Unterwerksabschnitte oder speisen abgehende Strecken einseitig. Dies ermöglicht den selektiven Schutz der Fahrleitung und die Rückleitung der erzeugten Bremsenergie in andere Streckenabschnitte mit Verbrauchern oder Unterwerken.

Bild 1.5 zeigt am Beispiel einer dezentral gespeisten Wechselstrombahn die Energieverteilung durch Unterwerke. Der Begriff *Speisebereich* bezeichnet dabei die Gesamtheit aller von einem Unterwerk im regulären Betrieb gespeisten Abschnitte. Ein *neutraler Abschnitt* ist ein Teil der Fahrleitungsanlage, der angrenzende Speiseabschnitte so trennt, dass sich diese nicht durch Stromabnehmer elektrischer Fahrzeuge überbrücken lassen.

*Schaltabschnitte* und *Schaltgruppen* in den Unterwerksbereichen sind durch Streckentrennungen oder Streckentrenner elektrisch abtrennbar, die im Grundschtzustand durch Oberleitungsschalter überbrückt und beim Befahren mit dem Stromabnehmer der Triebfahrzeuge kurzzeitig verbunden sind.

## 1.4 Gleichstrombahnnetze

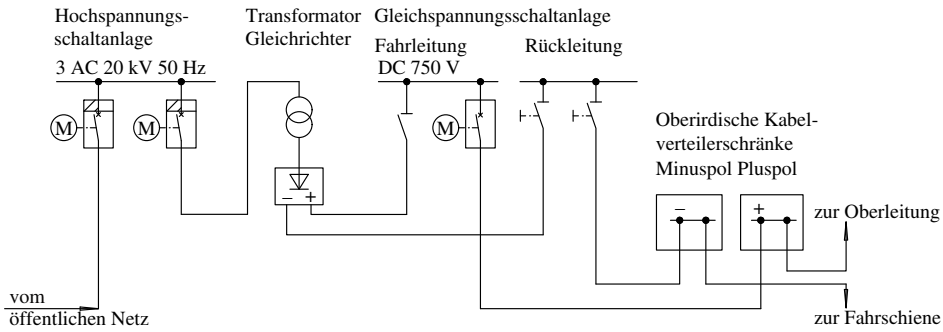
### 1.4.1 Allgemeines

Weltweit sind heute noch ungefähr ein Viertel aller elektrischen Vollbahnen *Gleichstrombahnen*. Von den im Nahverkehr verwendeten Nennspannungen bis DC 1,5 kV sind die Spannungen 0,6 kV und 0,75 kV am meisten verbreitet. Dabei liegen die Abstände der Unterwerke bei 1,5 bis 6 km. Bei Fernbahnen findet man DC 1,5 kV und 3 kV mit Unterwerksabständen bis 20 km. Die Leistungen von Gleichstromunterwerken reichen bei Straßenbahnen bis 3 MW und bei Massentransportanlagen und Vollbahnen bis 20 MW.

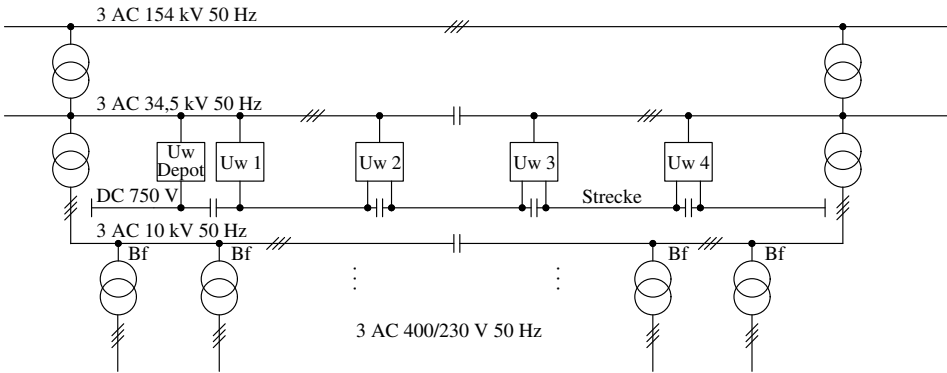
Die aus dem Landesnetz kommende dreiphasige Spannung formt das *Gleichrichterunterwerk* in Gleichspannung der jeweiligen Nennspannung des Fahrleitungsnetzes um. Als Gleichrichter wurden früher sechspulsige und werden heute vorwiegend 12- und 24-pulsige Stromrichter verwendet.

Die einzelnen Speisebereiche der Gleichstrombahnen sind in der Fahrleitung durch Streckentrenner getrennt und über die Sammelschienen der Unterwerke durchgeschaltet. Die Schaltanlagen in Gleichrichterunterwerken sind fabrikfertige Einheiten, die meist für die Belastungsklasse VI nach EN 60146-1-3 bemessen sind. Aus





**Bild 1.6:** Aufbau eines Gleichstromunterwerks einer Straßenbahn.



**Bild 1.7:** Strecken- und Bahnstoffspeisung für die Metro Ankaray in Ankara/Türkei.

Bild 1.6 ist der Aufbau eines Gleichstromunterwerkes einer Straßenbahn ersichtlich. Besondere Sorgfalt beim Errichten und Betreiben der Gleichstrombahnen ist der Triebstromrückführung zu widmen, um Gefährdungen durch Schienenpotenziale und die *Streustromkorrosion* zu vermeiden. Nähere Ausführungen hierzu finden sich im Abschnitt 6.5.

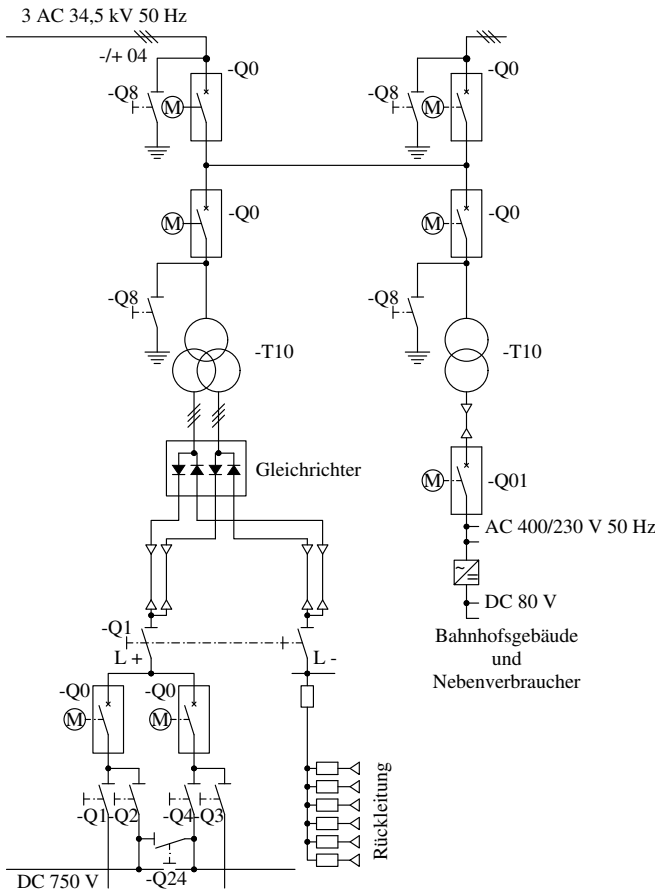
## 1.4.2 Metro Ankaray in Ankara

### 1.4.2.1 Streckenversorgung und Schaltung

Die Ankaray-Untergrundbahn in Ankara (Türkei) stellt ein typisches Beispiel für eine Speisung mit DC 0,75 kV dar. Die Strecke ist 9 km lang und hat elf Stationen. Die Fahrzeuge verkehren mit 120 s Zugfolge und *Seitenstromschienen* versorgen die Züge. Die Anfahrströme erreichen 3 000 A. Die installierte Traktionsleistung beträgt rund 1,2 MW pro km.

Die städtische Energieversorgung stellt mit zwei Speisestationen an beiden Streckenenden die elektrische Energie aus dem 154-kV-Netz bereit (Bild 1.7). Die Transformatoren 154/34 kV speisen den 34-kV-Mittelspannungsring zur Versorgung der Gleichrichterunterwerke und der Bahnhöfe über weitere Transformatoren und einen 10-kV-Mittelspannungsring.

Die vier 2,5-MW-Gleichrichterunterwerke stellen die Gleichspannung DC 750 V für die Hauptstrecke bereit. Der maximale Unterwerksabstand beträgt rund 2,8 km. Ein eigenes Gleichrichterunterwerk versorgt die Depot- und Instandhaltungsanlagen. Diese sind von der Hauptstrecke am Tunneleingang durch Isolation der Schienen sowie Lücken in den Stromschienen getrennt. Dadurch war es möglich, die Schienen im Depot mit der Schutzterde der Depot-Erdungsanlage zu verbinden.



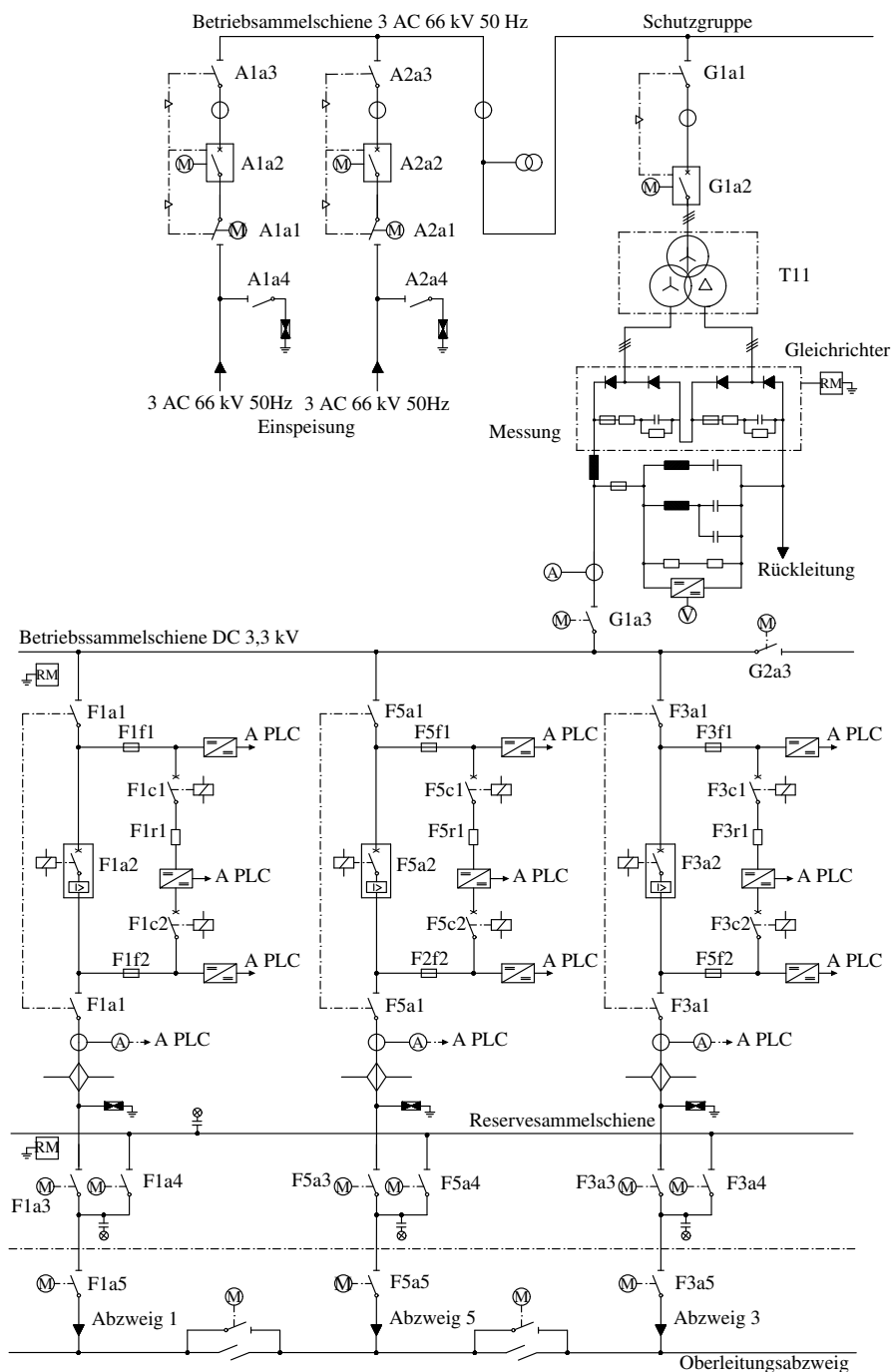
**Bild 1.8:** Übersichtsschaltplan eines Unterwerkes der Untergrundbahn Ankaray.  
 Q0 Leistungsschalter  
 Q1 bis Q4, Q24 Trennschalter  
 Q8 Erdungsschalter  
 Q11 Sammelschienen-trennschalter  
 T10 Transformator

Die Fahrschienen der Hauptstrecke sind zur Vermeidung von *Streuströmen* gegenüber der *Tunnelerdungsanlage* isoliert verlegt. Damit treten aufgrund der Bahnrückströme Längsspannungen in den Fahrschienen auf, die ein erhöhtes Gleis-Erde-Potenzial und damit Potenzialdifferenzen zu den Bahnsteigen zur Folge haben. *Kurzschließer* vom Typ SCD (Short Circuiting Device) zwischen den Fahrschienen und der Erdungsanlage vermeiden unzulässige Berührungsspannungen, die beim gleichzeitigen Anfahren mehrerer Fahrzeuge sonst nicht auszuschließen wären. Nach rund 10 Sekunden öffnen die Kurzschließer und reaktivieren die Überwachungsfunktion.

#### 1.4.2.2 Unterwerke und Komponenten

Bild 1.8 zeigt den Übersichtsschaltplan eines Unterwerkes für AC 34,5 kV/DC 750 V, das über eine Mittelspannungsschaltanlage an den 34-kV-Mittelspannungsring angeschlossen ist. Die Mittelspannungsanlage umfasst zwei Leistungsschalter zur Durchverbindung des Kabelringes, die AC-Leistungsschalter für den Stromrichtertransformator und den Transformator für die Gebäudeversorgung des benachbarten Bahnhofs und die erforderlichen Messwerterfassungen. Der *Stromrichtertransformator* in Gießharzausführung besitzt zwei Sekundärwicklungen, die um 30° versetzte Spannungen liefern. An jede Sekundärwicklung ist ein *Diodengleichrichter* in *Drehstrom-Brückenschaltung* angeschlossen, so dass auf der Gleichstromseite eine zwölfpulsige Gleichspannung entsteht.

Die Oberleitung speist über zwei Streckenabzweige mit Gleichstromleistungs- und Trennschaltern in die Oberleitungen links und rechts des Unterwerkes ein, wogegen der Minuspol über die Rückleitung mit den Gleisen



**Bild 1.9:** Übersichtsschaltplan für ein DC-3-kV-Unterwerk der ADIF.

verbunden ist. Eine Streckentrennung lässt sich in der Oberleitung vor dem Unterwerk für Instandhaltungszwecke oder Störfälle durch die Trennschalter Q24 überbrücken. Der Schutz erfasst Kurzschlüsse selektiv durch Messung der absoluten Stromwerte, des Anstiegs  $di/dt$  und der Sprunghöhe. *Gleichstromschnellschalter* mit *Löschkammern* schalten die Kurzschlussströme der Strecke nach der Auslösung durch den Streckenschutz ab.

### 1.4.3 Speisung mit DC 3,0 kV in Spanien

#### 1.4.3.1 Einführung

Das Netz des Infrastrukturbetreibers ADIF in Spanien ist rund 16 000 km lang. Davon sind rund 10 000 km elektrifiziert. Die elektrifizierten Strecken mit der spanischen Spurweite 1 668 mm sind mit DC 3,0 kV ausgerüstet. Insgesamt umfasst dieses Netz rund 6 500 km, wovon rund 2 900 km der Strecken zweigleisig und 3 600 km eingleisig sind. 330 Unterwerke versorgen diese Strecken. Vierzehn Fernsteuerzentralen steuern den elektrischen Betrieb. Hochspannungsseitig sind die Unterwerke an das 50-Hz-Landesnetz mit Spannungen zwischen 15 kV und 66 kV angeschlossen.

#### 1.4.3.2 Unterwerke

Bild 1.9 zeigt den Übersichtsschaltplan eines Gleichrichterunterwerkes zur Versorgung einer eingleisigen Strecke mit DC 3,0 kV. Das Unterwerk verfügt über

- zwei Einspeisungen,
- zwei Transformatorgleichrichtergruppen mit je 6,6 MVA Leistung, eine davon ist dargestellt,
- drei oder sechs Oberleitungsabzweige, je nach der Versorgung einer eingleisigen oder zweigleisigen Strecke,
- einen Transformator zur Speisung der Signaltechnik mit AC 50 Hz 2,2 kV und 25 kVA Leistung sowie einen Hilfstransformator, die im Bild nicht gezeigt sind.

Jede Einspeisung besitzt einen Leistungsschalter und speist auf die 66-kV-Sammelschiene. Die Messeinrichtung für die Leistung und Energie schließt sich an. Die Energieversorgungsunternehmen können über eine gemeinsame Übertragungseinheit den Energieverbrauch der Unterwerke überwachen. Diese Messeinrichtungen, erst nach der Liberalisierung der elektrischen Energieversorgung eingebaut, ermöglichen es der ADIF, günstigere Preise für die Energieversorgung zu erzielen.

Die Leistungstransformatoren T11 mit je 6,6 MVA haben einen Primärkreis und zwei Sekundärkreise. Ein Sekundärkreis ist jeweils in Sternschaltung und der andere in Dreieckschaltung angeschlossen, sodass ein Unterschied zwischen den Außenleitern von 60° erreicht wird. Jeder Sekundärkreis speist einen ungesteuerten, dreiphasigen Zweigebrückengleichrichter der Bauart Graetz mit der Ausgangsspannung DC 1,5 kV. Deren Reihenschaltung führt zur Ausgangsspannung DC 3,0 kV und zu einer zwölfpulsigen Gleichrichtung.

Zur Glättung des Ausgangsstroms ist am Pluspol des Gleichrichters eine Drossel mit rund 0,3 mH Induktivität angeschlossen. Zwischen dem positiven und negativen Pol der Gleichrichter sind zwei Oberschwingungsfilter mit den Frequenzen 600 bzw. 1 200 Hz angeordnet. Der Oberschwingungsfilter besteht aus einer Drossel und einem Kondensator.

Jeder Gleichrichterausgang ist über einen motorgetriebenen Trennschalter an einen Sammelschienenabschnitt angeschlossen. Die einzelnen Sammelschienenabschnitte lassen sich über Trennschalter verbinden. Im Normalbetrieb speist einer der Sammelschienenabschnitte die Streckenabschnitte links, der andere Sammelschienenabschnitt die rechts des Unterwerks über Oberleitungsabzweige mit Trenn- und Leistungsschaltern. Mit dieser Schaltung wird die Kurzschlussleistung begrenzt. Jeder Speiseabzweig verfügt über die erforderlichen Prüfeinrichtungen. Oberleitungstrennschalter zur Überbrückung der Streckentrennungen und die Reservesammelschiene ermöglichen Ersatzspeisungen für Instandhaltungs- und Störfälle.

#### 1.4.3.3 Steuerung und Schutz

Ließen sich die Unterwerke bis 1992 über dezentrale Steuertafeln mit Relais und Tastern steuern, führte ab 1992 der Einbau von programmierbaren Steuerungen zunächst im Master-Slave-Betrieb zur weiteren Zentralisierung der *Steuerung der Unterwerke*.