

7 Energieverteilung bei Wechselstrombahnen

7.1 Systeme und deren Eigenschaften

7.1.1 Einführung

Um die Vorteile der Wechselstrom-Traktion voll auszunutzen, geschieht nicht nur die Energiezuführung von einer Einspeisestelle zum Triebfahrzeug mit höherer Spannung, z. B. 15 kV, sondern häufig auch die Übertragung der Energie von den Erzeugereinheiten zu den Einspeisestellen der Oberleitung, z. B. 110 kV, wie dies im Kapitel 4 beschrieben ist. Für beide Aufgaben sind Transformatoren in den Unterwerken und auf den Triebfahrzeugen erforderlich.

In den Unterwerken wird die Spannung der von Kraft- und Umarterwerken ankommenden Fernleitungen auf die Fahrleitungsspannung und diese auf den Fahrzeugen auf die Verbraucherspannung herabgesetzt. Verbraucher sind die Traktionsmotoren oder die sie speisenden Stromrichter, ferner die Hilfsbetriebe – Lüfter und Kompressoren – sowie die Zugsammelschiene für Beleuchtung und Klimatisierung der Fahrgasträume in den Reisezugwagen.

Für den Energietransport zum Triebfahrzeug werden bei Wechselstrombahnen Ein- und Zweispannnungssysteme, vereinzelt auch noch Drehstromsysteme verwendet, die sich durch die Anzahl der Energieleiter und deren Polarität unterscheiden.

7.1.2 Einspannungssysteme

Wie bei allen spurgebundenen Elektro-Triebfahrzeugen wird die Energie über isolierte Oberleitungen oder Stromschienen dem Triebfahrzeug zugeführt und über Fahrschienen, die bei den AC-Bahnen geerdet sind, zurückgeleitet [7.1]. Hierdurch ergibt sich ein einpolig isolierter Aufbau des Speisesystems, das deshalb Einspannungssystem genannt wird. Auch die Bezeichnung *Einphasensystem* ist berechtigt, weil die Ströme in Hin- und Rückleitung gleich groß sind und gleiche Phasenlage aufweisen.

Dabei gehören zur

- *Hinleitung* die Oberleitungen, die meist aus dem Fahrdraht und dem Tragseil, jeweils in einfacher oder mehrfacher Ausführung, bestehen sowie evtl. vorhandene Speise-, Verstärkungs- und Umgehungsleitungen.
- *Rückleitung* die Fahrschienen und evtl. vorhandene Bahnrückleiter wie Rückleitungsseile sowie bei AC-Bahnen das Erdreich und darin befindliche leitfähige Bauteile. Diese Rückleiter werden häufig unter dem Begriff *Bahnerde* zusammengefasst.

Die Bezeichnungen Hin- und Rückleitung bei Wechselstrombahnen sind willkürlich gewählt, sie haben außer der Potenzialfestlegung null für die Rückleitung keine physikalische Bedeutung. Die Spannung zwischen diesen beiden Leitern wird als *Oberleitungsspannung* bezeichnet, ihre Größe kennzeichnet u. a. das jeweilige Oberleitungssystem.

Der einphasige Aufbau des Speisesystems spiegelt sich in der einpolig isolierten Bauweise der

Mittelspannungsschaltanlage wider, die durch die geerdete *Nullschiene* ergänzt wird. Sie verbindet die Rückleitung mit den Unterwerkstransformatoren. Zwischen diesen kann bei gleichphasigem Anschluss der Unterwerkstransformatoren ein Summenstromwandler, z. B. für den übergeordneten Schutz (s. Abschnitt 14.12.4.2.3) eingebaut werden, der den vom Unterwerk (Uw) abgegebenen Gesamtstrom erfasst.

7.1.3 Zweispannungssysteme

Zur Erhöhung der Übertragungsleistung und zur Reduzierung der Spannungsfälle längs der Fahrleitungen, aber auch zur Verminderung der Störbeeinflussung, hat sich bei vielen Wechselstrombahnen das *Zweispannungssystem* bewährt [7.2]. Es besteht aus dem Kettenwerk als *Positivfeeder* (PF), den längs der Strecke angeordneten Spartransformatoren und einem zusätzlichen isolierten Energieleiter. Er wird bei meist gleicher Belastbarkeit wie die Oberleitung ähnlich wie eine Verstärkungsleitung auf dem Oberleitungstragwerk mitgeführt, gegen Erde weist er aber das entgegengesetzte Potenzial wie das Kettenwerk auf und wird deshalb *Negativfeeder* (NF) genannt. Wie aus den Bildern 7.1 und 7.2 hervorgeht, bestehen folgende Verknüpfungen zwischen den genannten Energieleitern:

- Im Unterwerk durch den Haupttransformator, der die notwendigen Potenziale – also PF und NF – zur Verfügung stellt und dessen Mittelanzapfung mit den Fahrschienen verbunden und damit geerdet (E) ist.
- Längs der Strecke durch Spartransformatoren – meist als *Autotransformatoren* (AT) bezeichnet – die in einem Abstand von 5 bis 30 km aufgestellt sind. Auch deren Mittelpunkt wird an die Fahrschienen und evtl. vorhandene Rückleiterseile angeschlossen, während die Außenanschlüsse mit dem Kettenwerk PF und mit dem NF verbunden sind.

Zur einheitlichen Gestaltung der Ausrüstung von Fahrleitungen und Unterwerken, die zweipolig ausgeführt werden müssen, wird als Spannung zwischen NF und E häufig der gleiche Wert wie für die Oberleitungsspannung gewählt, die zwischen Kettenwerk und Erde auftritt. Die Übertragungsspannung PF-NF ist damit doppelt so groß wie die Oberleitungsspannung PF-E. Diese Energiezuführung längs der Strecke wird als *symmetrisches Zweispannungssystem* und das Spannungsniveau mit z. B. „2AC 30/15 kV“ bezeichnet. Wird für den Negativfeeder eine andere, dann meist höhere Spannung gegen Erde gewählt, lautet die Bezeichnung *unsymmetrisches Zweispannungssystem*, es wird dann z. B. „2AC 40/15 kV“ genannt. Dabei gibt der vordere Wert die Übertragungsspannung, auch Summenspannung genannt, und die andere Zahl die Nennspannung der Oberleitung wieder. Ein unsymmetrisches Zweispannungssystem mit 2AC 36/12 kV 25 Hz, also einer Feederspannung von 24 kV, wird zum Beispiel in Pennsylvania betrieben.

Obwohl bei einzelnen Betriebszuständen die beiden Spannungszeiger PF-E und E-NF die gleiche Phasenlage haben können, werden die Zweispannungssysteme auch als *Zweiphasensysteme* bezeichnet, weil die Ströme in den beiden Außenleitern PF und NF meist unterschiedliche Größe und Phasenlage haben.

Dieses seit beinahe 100 Jahren bekannte Speisesystem [7.3] wurde vor etwa 30 Jahren in größerem Umfang eingesetzt, insbesondere für die Versorgung von Hochleistungsstrecken, u. a. in Frankreich, Ungarn, Russland, Taiwan, Japan und Südkorea; dabei beträgt die Oberleitungsspannung 25 kV, die Übertragungsspannung $2 \times 25 \text{ kV} = 50 \text{ kV}$. Diese Bahnen werden mit der Frequenz der öffentlichen Energieversorgung betrieben, also 50 oder 60 Hz. Ausschlaggebend für die Entscheidung für dieses System waren in diesen Ländern sowohl die geringe Dichte von Hochspannungsleitungen der öffentlichen Energieversorgung für den Anschluss der Bahn-Unterwerke als vor allem auch die dadurch stark verminderte Beeinflussung von Fernmeldeleitungen.

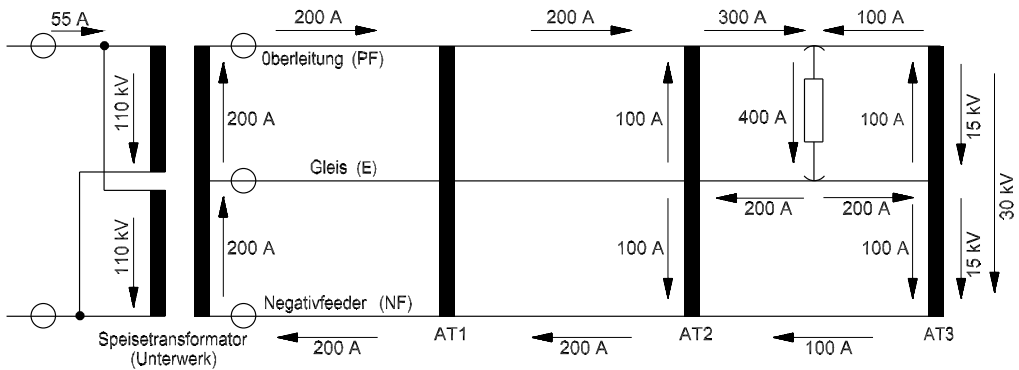


Bild 7.1: Ideale Stromverteilung beim Zweispannungssystem 2AC 30/15 kV.

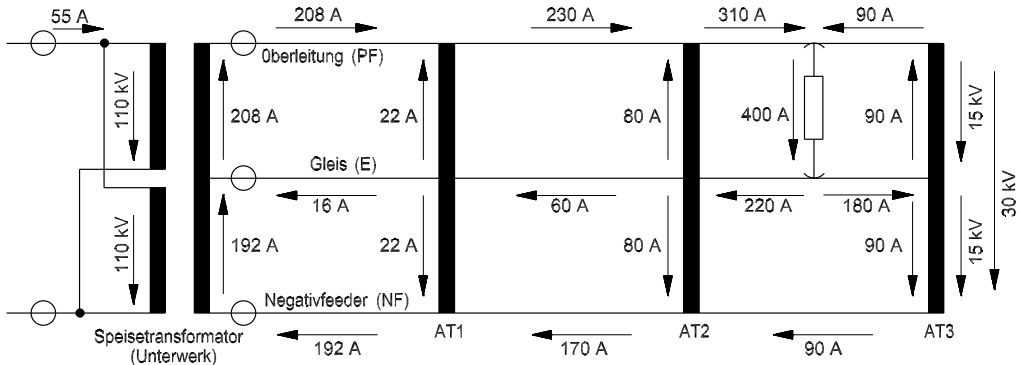


Bild 7.2: Reale Stromverteilung beim Zweispannungssystem 2AC 30/15 kV.

Aber auch bei der Deutschen Bahn sind konkrete Überlegungen vorhanden, ein symmetrisches Zweispannungssystem mit 2AC 30/15 kV bei 16,7 Hz einzusetzen, mittlerweile ist eine Pilotanlage zwischen Prenzlau und Stralsund in Betrieb [7.4]. Dadurch war es möglich auf das mittlere von drei dezentralen Umformerwerken zu verzichten. Die an beiden Oberleitungen vorhandenen Verstärkungsleitungen werden nach einigen Umbauten als Negativfeeder genutzt. Insgesamt sind fünf AT-Stationen in den betreffenden Streckenabschnitten eingefügt, in den beiden verbleibenden dezentralen Umformerwerken je eine AT-Station mit zwei 6-MVA-Autotransformatoren, in der Streckenmitte eine AT-Station ebenfalls mit zwei 6-MVA-Autotransformatoren und zusätzlicher Kuppelstellenfunktion sowie je eine AT-Station bei $1/4$ und $3/4$ der Strecke mit nur einem 6-MVA-Autotransformator. Die Gesamtstrecke ist 120 km lang bei 30 km Abstand der AT-Stationen.

Im Bild 7.1 ist die Stromverteilung für den Idealfall, also bei Vernachlässigung der Verluste und AT-Impedanzen, für 2AC 30/15 kV beispielhaft dargestellt: Der Speisetransformator mit der Übersetzung 110 kV/30-15 kV im Unterwerk ist links angeordnet, die Strecke wird durch drei Autotransformatoren in drei Abschnitte unterteilt. Im letzten Abschnitt befindet sich das Triebfahrzeug mit einer 400-A-Stromaufnahme. Dieser Verbraucherstrom teilt sich im Gleis zu gleichen Teilen von je 200 A nach beiden Seiten auf. In jedem der beiden angrenzenden Autotransformatoren mit dem Übersetzungsverhältnis 15 kV/15 kV ergibt sich die Stromaufteilung auf die beiden Wicklungen bei diesem symmetrischen System mit immer entgegengesetzter Strom-

richtung zur Erfüllung des Durchflutungsgleichgewichts exakt im gleichen Verhältnis 1 : 1 oder 100 A : 100 A. Jeweils 100 A fließen dann zum unten gezeichneten Negativfeeder und zu der über den Gleisen angeordneten Oberleitung. Damit beteiligt sich der abschließende Autotransformator mit 100 A am Verbraucherstrom der Oberleitung, die restlichen 300 A fließen von der anderen Oberleitungsseite zu. Sie setzen sich zusammen aus den schon erwähnten 100 A im Primärteil des anderen Autotransformators und 200 A, die über die Oberleitung vom Unterwerk her zufließen.

Man erkennt für diesen Idealfall beim symmetrischen Zweispannungssystem 2AC 30/15 kV:

1. Die Energieübertragung vom Unterwerk zum Verbraucher geschieht über weite Strecken, nämlich vom Unterwerk bis zum Autotransformator vor dem Belastungsort, mit nur dem halben Laststrom im PF-NF-Kreis, der mit der Übertragungsspannung, also 30 kV, betrieben wird, im Beispiel 200 A.

Anmerkung: Auch bei dem unsymmetrischen Zweispannungssystem ist der Übertragungsstrom in beiden Leitern ungefähr gleich groß. Er errechnet sich als Produkt von Laststrom und Verhältnis von Fahrleitungsspannung zur Summenspannung.

2. In den Gleisen und im Erdreich, sowie in den evtl. vorhandenen Rückleiterseilen fließt
 - vom Unterwerk bis zum Autotransformator vor dem Triebfahrzeug kein Strom,
 - der Strom vom Triebfahrzeug weg in jeweils entgegengesetzter Richtung zu den diesen Abschnitt begrenzenden Autotransformatoren.

Beide Feststellungen tragen zu der für das Zweispannungssystem typischen Reduzierung der Beeinflussungsspannung in parallel verlaufenden Fernmeldeleitungen bei.

3. Der im Unterwerk messbare *Abzweig-Summenstrom*, der sich aus den Strömen in der Oberleitung und im Negativfeeder zusammensetzt, hat beim symmetrischen System die gleiche Größe wie der Laststrom, im Beispiel: $200\text{ A} + 200\text{ A} = 400\text{ A}$.

Anmerkung: Beim unsymmetrischen Zweispannungssystem ergibt sich der Laststrom als Produkt von halbem Abzweigsummenstrom und Verhältnis von Summenspannung zur Fahrleitungsspannung.

4. Der Mittelanschluss der Autotransformatoren wird mit der Summe der in den Teilwicklungen fließenden Ströme belastet.

Bild 7.2 zeigt dagegen die reale Stromverteilung, die die Impedanzen und die Verluste der Autotransformatoren und Leitungen sowie die elektromagnetischen Kopplungen des Gesamtsystems berücksichtigt. Der Hauptunterschied zeigt sich dabei an den Autotransformatoren: Dort fließt beim symmetrischen System der Strom nicht nur zu gleichen Teilen in die Wicklungen, sondern auch zu einem kleinen Teil, nämlich weniger als 30 %, in den Gleisen, dem Erdreich und den evtl. vorhandenen Rückleiterseilen.

Die Energiezuführung längs der Strecke geschieht

- zum Triebfahrzeug mit der Oberleitungsspannung auf direktem Weg über das Kettenwerk (PF) und die Fahrschienen (E) und zwar sowohl vom Haupttransformator im Unterwerk – dieser Anteil nimmt mit wachsender Entfernung des Verbrauchers vom Unterwerk ab – als auch von den Autotransformatoren. Dabei wird der dem Triebfahrzeug nächstgelegene Autotransformator am stärksten belastet. Befindet sich der Verbraucher zwischen zwei Autotransformatoren – *train in section* –, steuern diese den Hauptteil der erforderlichen Energie bei und führen sie dem Fahrzeug sowohl in der Oberleitung als auch in den Fahrschienen zweiseitig zu,
- zu den Autotransformatoren mit der Übertragungsspannung über den erdfreien zweipolig isolierten Weg PF-NF.

Die unterspannungsseitigen Wicklungen des Speisetransformators im Unterwerk, die über den mit den Gleisen verbundenem Mittelpunkt in Reihe geschaltet sind, werden dabei ungleichmäßig belastet, nach dem Beispiel in Bild 7.2 mit 208 A und 192 A. Dies macht ihre Entkopplung zweckmäßig, so dass sie auch mit getrennten Hochspannungswicklungen verkettet werden. Diese wiederum werden im Transformator-kessel parallel geschaltet, weshalb für ihren Netzanschluss nur zwei Hochspannungs-Durchführungen benötigt werden. Damit wird zusätzlich eine gleichmäßige Anordnung des Eisenkerns und der Wicklungen erreicht, die zu einem symmetrischen Aufbau des Transformators führt. Die Ungleichmäßigkeit der Belastung von Positiv- und Negativwicklung vergrößert sich mit kürzer werdendem Lastabstand vom Unterwerk.

Die Summenleistung aller Autotransformatoren einer Strecke wird im Allgemeinen mit 120 . . . 150 % der benötigten Leistung angenommen. Bei gleichmäßiger Verteilung der benötigten Leistung auf der Strecke werden auch die Autotransformatoren annähernd gleichmäßig längs der Strecke verteilt mit geringfügiger Verkürzung der Abstände in Richtung zum speisenden Unterwerk. In der Nähe von Belastungsschwerpunkten werden die Abstände dagegen stark reduziert. Autotransformatoren für unsymmetrische Systeme werden bei gleicher Streckenlast strommäßig stärker belastet als symmetrische Spartransformatoren, weil die größere Windungszahl der Negativwicklung einen höheren Strom in der Positivwicklung zur Erfüllung des Durchflutungs-gleichgewichts erzwingt. Dies führt zu der gewünschten Reduzierung der Stromstärken in den Fahr- und Feederleitungen zwischen Unterwerk und Autotransformatoren.

Im Zweispannungssystem werden die Strecken immer durch einen Autotransformator oder durch den Speisetransformator für die beiden Teilspannungen im Nachbar-Unterwerk abgeschlossen. Dabei wird die Reichweite dieses Speisesystems hinsichtlich

- Verminderung der Rückstrom-Störbeeinflussung durch den Anschluss der Transformator-Mittelan-zapfungen an den Gleisen begrenzt, der möglichst impedanzlos und bei symmetrischen Systemen für den doppelten Nennstrom auszuführen ist,
- Reduzierung des Spannungsfalls durch den Anschluss der Transformatoren an die Oberleitung be-stimmt.

Die Triebfahrzeuge werden daher auch bei einseitiger Streckenspeisung von beiden Seiten mit zwei Systeme gespeist – und zwar sowohl bei der Hin- als auch bei der Rückleitung – was zusätzlich zur Verminderung der Spannungsfälle beiträgt.

Zweisystemige Speisung bedeutet hier, dass die Versorgung von zwei unterschiedlichen Energiesystemen her geschieht. Beim Zweispannungssystem erfolgt diese Doppelspeisung im Allgemeinen zwar räumlich vom gleichen Unterwerkstransformator, elektrisch aber sowohl von seiner Positivwicklung über den Positivfeeder als auch zusätzlich von der Negativwicklung über den Negativfeeder. Die Autotransformatoren dienen dabei als Koppelglieder. Im Beispiel nach Bild 7.2 sind beim symmetrischen System die beiden Teilströme mit 208 A und 192 A annähernd gleich groß. Damit beteiligen sich beide Teilsysteme etwa mit gleich großer Leistung bei ungefähr gleichem Leitungswiderstand. Aus der Sicht des Verbrauchers können daher beide Speiseeinheiten mit ihren Leitungsimpedanzen als parallel geschaltet und gleich groß betrachtet werden.

Wird – wie in dem Beispiel angenommen – die Übertragungsspannung, also die Spannung zwischen Kettenwerk und Negativfeeder, mit dem doppelten Wert der Oberleitungsspannung betrieben, so führt dies über weite Strecken im Vergleich zu Einspannungssystemen etwa zur Halbierung der Belastungsströme und damit zur Halbierung des Spannungsfalls. Dieser Spannungsfall bezieht sich jetzt aber nicht auf die Oberleitungsspannung, sondern auf die doppelt so große Übertragungsspannung. Unter Vernachlässigung der Verluste und Streublindwiderstände der Autotransformatoren errechnet sich daher eine Verminderung des Spannungsfalls in der Oberleitung um eine Verhältniszahl von 4,0 gegenüber einer Oberleitung ohne Verstärkungsleitung und ohne Rückleiterseile, wenn sich der Verbraucher direkt am Autotransformator befindet. In der Praxis kann damit ein Verhältniswert von 2,5 bis 3,5 erreicht werden. Allerdings bedingen Zweispannungssysteme im Allgemeinen eine zweipolige Ausführung der Schaltanlagen und ein entspre-

chend höheres Isolationsniveau zwischen den beiden Phasen.

Eine interessante Variante [7.4] stellen die kombinierten Einspannungs-/Zweispannungssysteme dar, bei denen die beiden Teilspannungen nicht durch die Unterwerks-Speisetransformatoren gewonnen werden, sondern von Autotransformatoren, die vom Einspannungssystem gespeist werden, aber das Zweispannungssystem erzeugen. Da hier ein Großteil der Streckenleistung über die Eingangs-Autotransformatoren transportiert wird, sind diese für etwa 50 % der Streckenbelastung auszuliegen, wodurch die Summe der installierten AT-Leistung auf etwa 150 . . . 180 % steigt.

7.1.4 Drehstromsysteme

Obwohl 1903 bei Probefahrten im Raum Berlin auf der Versuchsstrecke Marienfelde–Zossen Triebwagen mit Drehstromantrieb die beachtliche Höchstgeschwindigkeit von über 210 km/h erreicht haben [7.5], hat sich dieses Energiezuleitungssystem nicht durchsetzen können. Gründe dafür sind die komplizierte dreipolige Oberleitung [7.6], die damals noch seitlich über den Gleisen angeordnet und mit einer zwischen 6 und 14 kV variablen Spannung sowie 25 bis 50 Hz veränderbaren Frequenz betrieben wurde [7.7], und die beim Ändern der Motordrehzahl und damit der Fahrgeschwindigkeit entstehenden elektrischen Verluste.

In Norditalien wurden noch bis 1976 Vollbahnen mit Drehstrom $3 \times 3,6 \text{ kV } 16\frac{2}{3} \text{ Hz}$ betrieben, damit konnte auf aufwändige Getriebe in den Lokomotiven verzichtet werden. Heute sind in Europa nur noch in der Schweiz die beiden 10 km langen Bergbahnen von der Kleinen Scheidegg auf das Jungfrauoch in Grindelwald mit Drehstrom $3 \times 1125 \text{ V } 50 \text{ Hz}$ und die Gornergratbahn in Zermatt mit Drehstrom $3 \times 725 \text{ V } 50 \text{ Hz}$ in Betrieb, allerdings jeweils mit einer zweipolig isolierten Oberleitung über den Gleisen. Der dritte Leiter des Drehstromsystems ist mit den Fahrschienen verbunden und damit geerdet. Der Antrieb geschieht durch Asynchronmotoren mit Stellwiderständen im Läuferkreis.

In Mittelamerika wird die Schlepplbahn längs des Panamakanals mit Drehstrom versorgt, ebenso in Südamerika die Bahn auf den Corcovado in Rio de Janeiro.

Weltweit werden auf internationalen Großflughäfen *People Mover* eingesetzt. Diesen Nahverkehrs-Fahrzeugen muss wegen der Gummibereifung auch die Schutzerde zugeführt werden, weshalb in den bisherigen Ausführungen mit Drehstrom-Versorgung fünf Stromschienen (L1, L2, L3, N und PE) erforderlich sind. Die angewandten Leiter-Leiter-Spannungen liegen zwischen 500 und 600 V bei 50 oder 60 Hz. Die mit Thyristoren ausgeführte Anschnittsteuerung führt zu einer relativ hohen Blindleistungsaufnahme, die allerdings bei der verhältnismäßig kleinen Gesamtleistung der Fahrzeuge von einigen 100 kW und den kurzen Speiseabschnitten kein besonderes Problem darstellt.

7.1.5 Gebräuchliche Nennspannungen und Frequenzen

In Europa sind die *Nennspannung* elektrischer Bahnen in EN 50163 genormt, die abhängig von der Dauer unter- und überschritten werden dürfen (s. Tabelle 1.2). Weltweit waren im Jahr 2003 etwa 140 000 Streckenkilometer [7.8] mit diesen genormten Wechselspannungen, einschließlich 25 kV 60 Hz, in Betrieb. Weiter werden in Deutschland nur noch die Industriebahnen der *Rhein-Braun-AG* im Köln-Aachener Kohlebecken mit 1AC 6,25 kV 50 Hz betrieben und zwar die Nord-Süd-Bahn und die Hambachbahn mit insgesamt 240 elektrifizierten von 320 vorhandenen Gleiskm. Die seit 1936 für Versuchszwecke mit 1AC 20 kV 50 Hz ausgerüstete *Höllentalbahn* von Freiburg nach Seebrugg und die mit 1AC 15 kV 50 Hz betriebene Industriebahn der Preussag in Ibbenbüren bei Osnabrück wurden entsprechend dem fortschreitenden Elektrifizierungsprogramm der damaligen Deutschen Bundesbahn 1960 bzw. 1974 auf 1AC 15 kV 16,7 Hz umgestellt.

Seit 1962 ist die 28 km lange Strecke Blankenburg–Königshütte im Harz mit 25 kV 50 Hz in Betrieb, die vom Unterwerk Blankenburg/Harz versorgt wird.

In Europa sind außerdem über 1 000 km, in Ostasien und in den anderen Kontinenten ungefähr 7 000 Streckenkilometer mit Wechselspannungen elektrifiziert, die von den in der Tabelle 1.2 genormten Werten abweichen. Dabei betragen bei 760 bis 1 680 mm Spurweite die Nennspannungen 11 ... 50 kV und die Frequenzen 16,7 ... 60 Hz.

7.2 Spezielle Aufgaben der Schaltanlagen in der AC-Bahnenergieversorgung

Im Abschnitt 5.3 sind sowohl die Definitionen als auch die wesentlichen Aufgaben der Schaltanlagen zusammengestellt, im Einzelnen:

- Verteilung auf der Energiebezugsseite.

Auch bei AC-Bahnen wird zwischen zentraler und dezentraler Bahnstromversorgung unterschieden, wie dies in der Tabelle 1.3 dargestellt ist. So betreiben mehrere mitteleuropäische Bahnverwaltungen und die Eisenbahnbetreiber ein überlagertes Fahrleitungsnetz überlagerte Hochspannungsleitungen mit unterschiedlichen Spannungen, aber mit der Bahnfrequenz 16,7 Hz. Nähere Angaben hierzu in Abschnitt 4.2.

- Umwandlung der zugeführten Energie in oberleitungskonforme Energie.

In den AC-Unterwerken wird das Umspannen der ankommenden Hochspannung in die frequenzgleiche Fahrleitungsspannung durch Transformatoren vorgenommen.

Umarterwerke, die entweder als Umformerwerke mit rotierenden Maschinen oder als Umrichterwerke mit leistungselektronischen Komponenten ausgerüstet sind, wandeln die ankommende Stromart – meist Drehstrom mit Frequenz der Landesversorgung, also 50 oder 60 Hz – in Wechselstrom der geforderten Frequenz um. Transformatoren sorgen auch hier für die Anpassung der Umarter-Ausgangsspannung an die Fahrleitungsspannung. Diese Anlagen der Bahnstromversorgung werden ebenfalls häufig als *Unterwerke* bezeichnet, obwohl sie zusätzlich die Aufgabe eines Umformer- oder Umrichterwerks erfüllen.

- Einspeisung ins Oberleitungsnetz.

Hierfür dienen

- im zentralen Netz die Unterwerke und der Unterwerksteil von Umarterwerken, die auch in das überlagerte Hochspannungsnetz speisen,
- im dezentralen Netz die dezentralen Umformer- und Umrichterwerke, die ebenfalls häufig als Unterwerke bezeichnet werden.

- Zusammenschaltung des Oberleitungsnetzes.

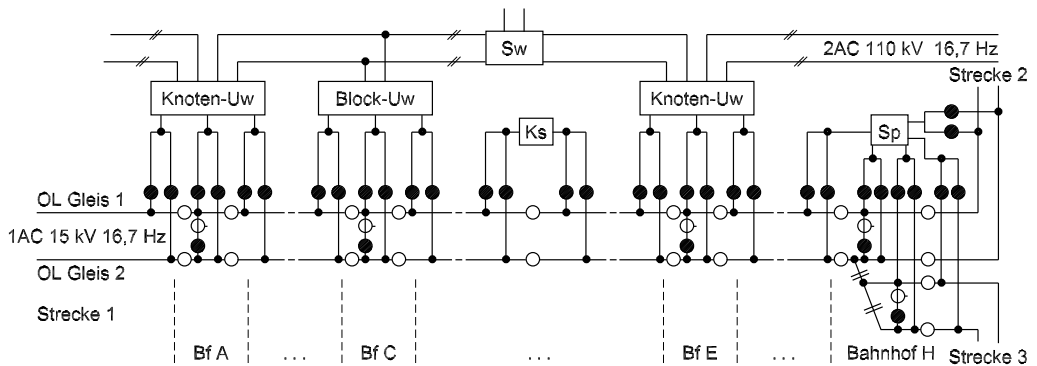
Außer in den Unterwerken geschieht dies in Schaltposten und Kuppelstellen, in denen keine Energie aus einem übergeordneten Netz eingespeist wird.

- Verbesserung der Spannungshaltung.

Häufig werden aus wirtschaftlichen Gründen Zwischen-Unterwerke gebaut, die weniger der Energiebereitstellung als zur Spannungsstützung dienen und damit die Fahrleitungsverluste vermindern. In manchen Fällen ist allerdings der Übergang vom Einspannungs- ins Zweispannungssystem (s. Abschnitt 7.1.3) die günstigere Variante.

Tabelle 7.1: Bauformen der Schaltanlagen.

Unterscheidungsmerkmal	Anlagen- und Ausrüstungstypen
Funktion	Schaltwerke (Sw), Unterwerke, Umarterwerke, Schaltposten, Kuppelstellen (Ks) und Autotransformatorenstationen (s. Bild 7.3)
Stromart der HS-Anlage	dreipolig isoliert für Drehstromeinspeisung, zweipolig isoliert für Einphasen-Wechselstromanlagen
Spannungssystem für Fahrleitungseinspeisung	Ein- und Zweispannungs-systeme
Beweglichkeit	ortsfeste, kranbare und fahrbare Anlagen
Örtliche Lage im HS- und MS-Netz	Knoten- und Zwischenunterwerke
Anzahl der HS-Sammelschienen	Einfach- und Doppelsammelschiene
Anzahl der MS-Sammelschienen	ein und mehrere Betriebs-sammelschienen, mit und ohne Ersatz- oder Umgehungsschiene, mit und ohne Prüfsammelschiene,
Unterbringung der Betriebsmittel	Freiluft- und Innenraumanlagen, Gebäude und Container
Isolationsart	luft- und gasisoliert
Anordnung der HS-Betriebsmittel	Quer- und Längsanordnungen
Anordnung der MS-Betriebsmittel	einreihige und mehrreihige Aufstellung der Schaltzellen, freistehend oder Wandanordnung, ein- oder mehrgeschossig
Art der Transformatorverladung	Gleis- und Straßenanschluss für Schwerlasttransporte

**Bild 7.3:** Anordnung der Schaltanlagen im Hoch- und Mittelspannungsnetz der DB.

● Fahrleitungstrennschalter EIN; ○ Fahrleitungstrennschalter AUS; Φ Stromwandler; +|– Streckentrennung

7.3 Bauformen der Schaltanlagen

7.3.1 Unterscheidungsmerkmale und Bestandteile

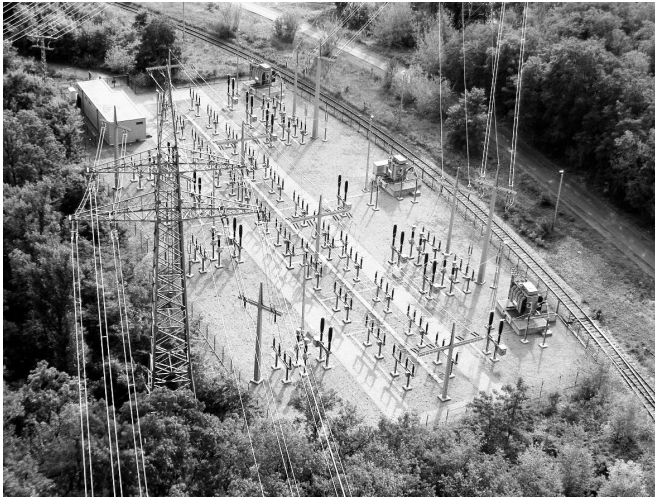
Schaltanlagen für die AC-Bahnstromversorgung lassen sich mit Hinblick auf die Angaben in Abschnitt 5.4.2 entsprechend den in Tabelle 7.1 genannten Merkmalen in verschiedene Bauformen, d. h. Anlagen- und Ausrüstungstypen unterscheiden.

Die funktional verschiedenen Schaltanlagentypen wie Unterwerke, Schaltposten und Kuppelstellen sind gemäß Bild 7.3 in den Hoch- und Mittelspannungsnetzen angeordnet und werden in den nachfolgenden Abschnitten anhand von Anwendungsbeispielen für ausgewählte Ausrüstungstypen näher erläutert. In diesem Bild sind von den Schaltgeräten nur die Fahrleitungstrennschalter und -stromwandler dargestellt.

Schaltanlagen setzen sich aus verschiedenen Hauptbestandteilen gemäß Tabelle 7.2 zusammen.

Tabelle 7.2: Hauptbestandteile der Schaltanlagen.

Hauptbestandteile	Betriebsmittel, Elemente
Primärtechnik der Hoch- und Mittelspannungsanlage	Leistungs- und Autotransformatoren, Umarter, Leistungs-, Last-, Lasttrenn-, Trenn- und Erdungsschalter, Messwandler, Erdungs- und Rückleitungsanlage
Sekundärtechnik	Eigenbedarfsversorgung, Leit- und Schutztechnik
Stahlbau- und Betonbau	Masten, Schaltgerüste und Stützen zur Befestigung der Betriebsmittel
Gebäude und Außenanlagen	Schalhäuser, Fundamente, Erdungsnetz, Straßen und Wege, Entwässerungsanlagen, Kabelkanäle, Schalt- und Verteilerschränke, Beleuchtung, Blitzschutz, Umzäunung

**Bild 7.4:** Ansicht eines Knotenunterwerkes (Luftbild DB).

7.3.2 Unterwerke

7.3.2.1 Knotenunterwerke

Knotenunterwerke (s. Bild 7.4) verbinden und trennen Hochspannungsfernleitungen elektrisch, spannen die Hochspannung (HS) des Fernleitungsnetzes in die Mittelspannung (MS) des Fahrleitungsnetzes um und verteilen die Bahnenergie in die einzelnen Speiseabschnitte. Sie besitzen dazu HS- und MS-Anlagen sowie Transformatoren.

Knotenunterwerke befinden sich im Bereich von Fernleitungs- und Eisenbahnkreuzungen und/oder -abzweigen. Von ihrer Verfügbarkeit hängt deshalb die Zuverlässigkeit des elektrischen Eisenbahnbetriebs in hohem Maße ab. Die HS-Anlagen werden aus diesem Grund mit einer oder mehreren Betriebssammelschienen (BSS) und mehreren Längstrennungen (LT) ausgerüstet, um Ersatzspeisemöglichkeiten bei Instandhaltungsarbeiten und Störungen zu sichern (s. Bilder 7.5 und 7.6). In solchen Fällen wird nur ein einzelner Abschnitt abgeschaltet und über die restlichen Anlagenteile der Betrieb aufrechterhalten. In Bild 7.5 sind auch die Abzweigtypennummern des Normkatalogs der DB [7.13] mit aufgeführt.

MS-Anlagen von Knotenunterwerken bestehen aus einer oder mehreren BSS mit mehreren LT sowie bei Bedarf einer Prüfsammelschiene (PSS), einer Ersatz- oder Umgehungsschiene sowie den Transformator- und Oberleitungsabzweigen (s. Bild 7.33). Bei Zweispannungsanlagen müssen die Sammelschienen zweipolig für die Oberleitung und den Negativfeeder ausgeführt werden (s. Bild 7.7). MS-Anlagen können als Freiluftanlagen errichtet oder aufgrund der geringeren