

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 109 (1991)  
**Heft:** 29: S-Bahn Zürich

**Artikel:** Sicher Bahnstromversorgung  
**Autor:** Lörtscher, Manfred / Nussberger, Huldreich  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-85983>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 13.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Sichere Bahnstromversorgung

**Das S-Bahn-Betriebskonzept stellte mit seinen neuen Strecken, neuen Durchmesserlinien, neuem Rollmaterial, neuem Fahrplan stark veränderte Anforderungen an die Bahnstromversorgung im Raum der S-Bahn Zürich, wobei auch der gemischte Betrieb von S-Bahn-Zügen, IC-Zügen und Güterzügen sowie die künftigen Ausbauten zu berücksichtigen waren. Der Betrieb der 15-kV-Bahnstromanlagen wird seit Anfang März 1991 durch eine neue, rechnergestützte Kreisleitstelle in Zürich wirkungsvoll unterstützt.**

## Konzept der Bahnstromversorgung

### Ausgangslage

Vor genau 75 Jahren wurde die Elektrifizierung der Gotthardstrecke beschlossen und damit der elektrische Betrieb

VON MANFRED LÖRTSCHER  
UND  
HULDREICH NUSSBERGER,  
ZÜRICH

auf dem ganzen Netz der SBB eingeleitet [1]. Der Fahrdrabt-Querschnitt wurde damals mit 100 mm<sup>2</sup> Kupfer festgelegt. Abgesehen von den Nord- und Südrampen der Gotthardlinie, wo zwischenzeitlich der Querschnitt auf rund 240 mm<sup>2</sup> pro Gleis erhöht wurde, konnte mit diesem Querschnitt in bezug auf Stromtragfähigkeit und Spannungshaltung bis heute auf dem ganzen Netz problemlos elektrisch gefahren werden. Im Bereich Vorortsverkehr mussten bis heute nur in den Jahren 1968–70 gezielte Massnahmen zur Verstärkung der Bahnstromversorgung ergriffen werden: Die leistungsfähigen Triebzüge der Serie RABDe 12/12 und der bereits 1968 realisierte Halbstundentakt verlangten einen Querschnitt von 2×240 mm<sup>2</sup> auf der Strecke Zürich–Meilen–Rapperswil und den Bau eines neuen Unterwerks Zürich am Sihlquai mit installierten Trafoleistungen von 3×20 MVA. Die Bahnstromversorgung rund um Zürich stützte sich auf die Unterwerke Zürich, Seebach, Sihlbrugg und Rapperswil.

### Anforderungen an den Ausbau

Der zu erwartende hohe S-Bahn-spezifische Wirkenergiebedarf von 80 bis 90 Wh/tkm mit Fahrplan-Intervallen in den Spitzenzeiten von 15 und 30 Minuten auf allen S-Bahn-Linien, der Halbstundentakt im IC-Verkehr mit Zugfolgezeiten von 2–3 Minuten im Knoten Zürich sowie die mit der Neubaustrecke möglichen S-Bahn-Durchmesserlinien (statt Ein- und Ausfahrten mit 40 km/h

im Kopfbahnhof Zürich) verlangten eine genaue Prüfung der Bahnstromversorgung im Grossraum Zürich. Gegenüber den bisher üblichen langsamen Ausbautätigkeiten im gesamten Bahnbereich, welche nur kleine stufenweise Anpassungen bei der Bahnstromversorgung mit sich brachten, veränderten sich die Versorgungsverhältnisse mit der Betriebsaufnahme des S-Bahn-Fahrplans am 27. Mai 1990 schlagartig.

### Charakteristik der S-Bahn-Verbraucher

Bis Mai 1990 wurden 24 neue Doppelstockzüge [2] in Betrieb genommen. Bis zur Ablieferung der 26 (2. Serie) und 45 (3. Serie) weiteren Doppelstockzüge wird die Hauptlast des S-Bahn-Verkehrs durch eine grosse Anzahl Triebwagen der Serie RBe 4/4, Lokomotiven vom Typ Re 4/4 II sowie die Triebwagenzüge der Serie RABDe 12/12 getragen. Diese Triebfahrzeuge zählen alle zu den sog. Direktmotortriebfahrzeugen, welche am Fahrleitungsnetz einen stark geschwindigkeitsabhängigen Leistungsfaktor Lambda aufweisen (Bild 1). Dieser Faktor gibt an, welches Verhältnis zwischen der Wirkleistung (Zugkraft mal Geschwindigkeit am

Rad plus die Verluste) und der Scheinleistung besteht. Mit diesem Faktor wird zugleich angegeben, wie gross die Verschiebung zwischen Netzspannung und Netzstrom ist. Bei einem tiefen Leistungsfaktor fliessen in den Fahrleitungsanlagen unnötig grosse Ströme mit ihren Verlusten, ohne dass entsprechende Wirkleistungen übertragen werden.

Alle diese Triebfahrzeuge haben eine elektrische Netzbremse, welche ebenfalls einen stark geschwindigkeitsabhängigen Leistungsfaktor haben: Neben dem zurückgespeisten Strom muss das Unterwerk beim Bremsen zum Teil erheblichen Blindstrom zur Verfügung stellen. Gesamthaft kann die Energiebilanz ab Unterwerk durch die elektrischen Netzbremsen verbessert werden, wobei aber der Blindenergie-Bedarf je nach Bremsschaltung unter Umständen vergrössert wird. In jedem Fall bedeutet das elektrische Netzbremsen für den betroffenen Fahrleitungsabschnitt eine zusätzliche Belastung. Bei der Evaluation der neuen Doppelstockzüge stand lange Zeit als Antriebstechnik die Abschnittsteuerung mit Netzbremse zur Diskussion. Erst relativ spät wurde entschieden, die neuen Triebfahrzeuge mit der netzfreundlichen Umrichtertechnik [2] mit Netz-Pulsstromrichter auszurüsten.

Diese neue Technik erlaubt es, den Leistungsfaktor am Fahrleitungsnetz sowohl beim Fahren wie beim elektrischen Bremsen so einzustellen (nahezu 1), dass der Blindstrombedarf praktisch vernachlässigbar wird. Dagegen wären beim zuerst vorgesehenen, massierten Einsatz von Triebfahrzeugen mit An-

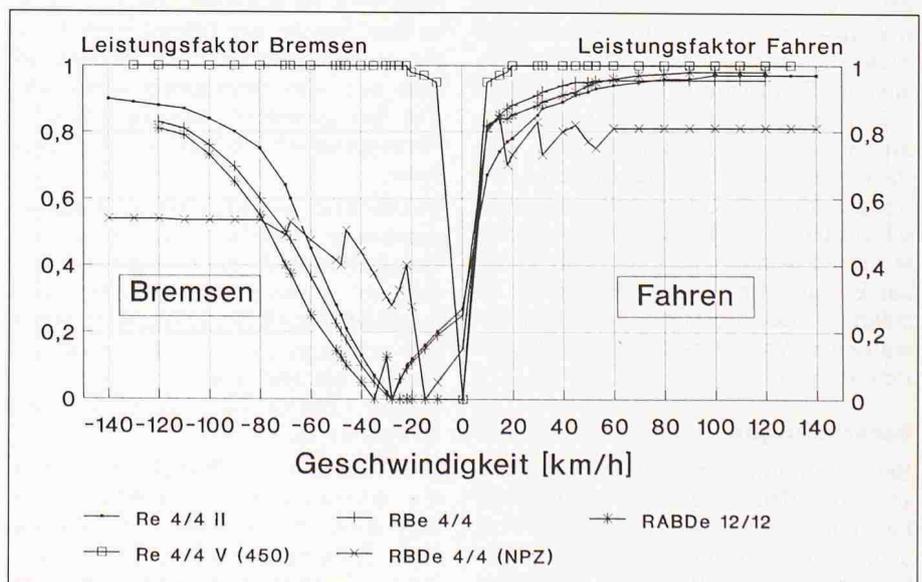


Bild 1. Leistungsfaktor Lambda

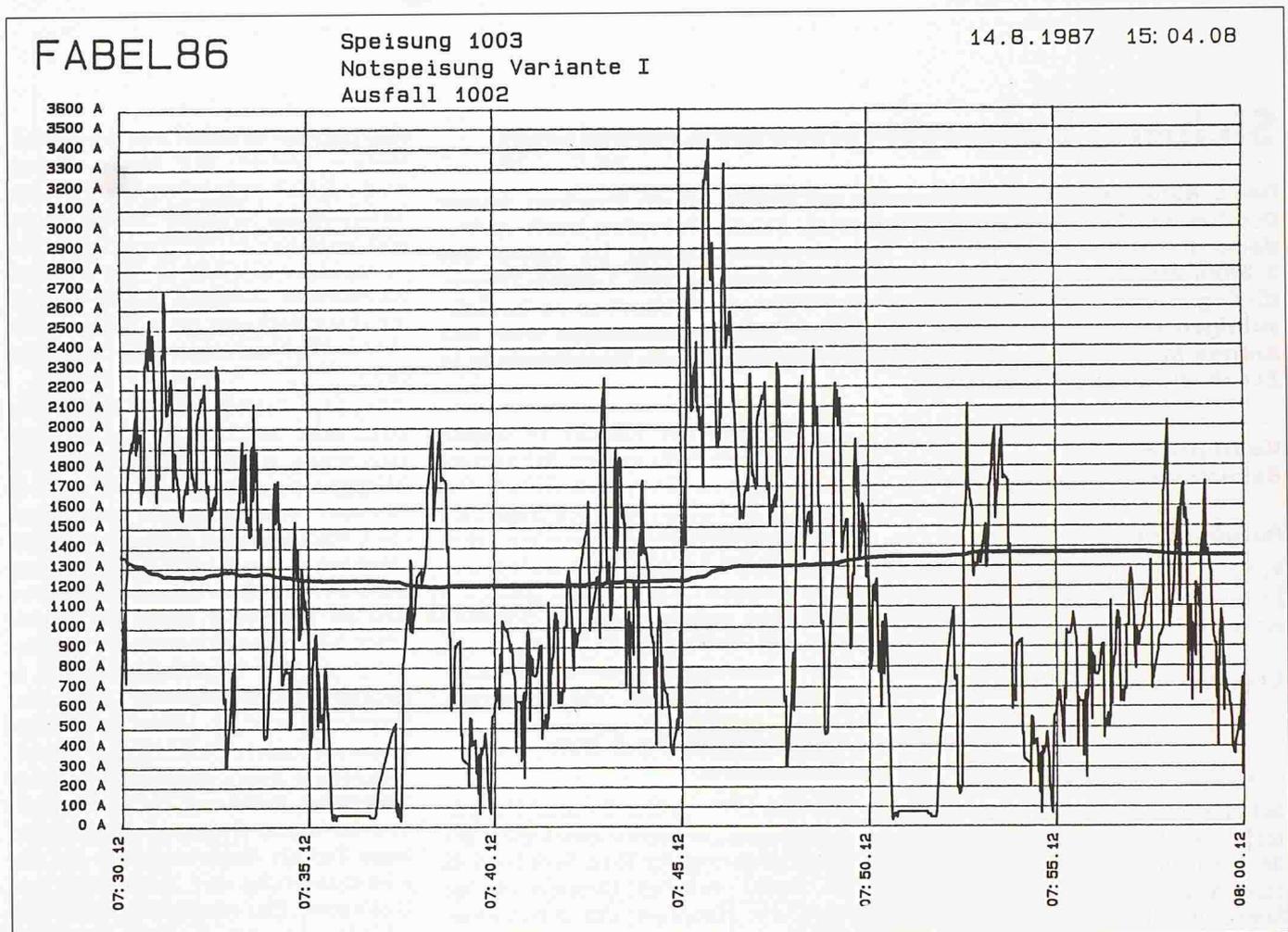


Bild 2. Stromberechnung mit Personal Computer

schnittsteuerung Massnahmen zur Blindstromkompensation unabdingbar geworden: Nach entsprechenden Versuchen mit einer fahrbaren Blindleistungs-Kompensationsanlage der Deutschen Bundesbahn im Jahr 1984 wurden erste Berechnungen für solche Anlagen für die Standorte Hedingen, Killwangen, Meilen, Effretikon und Bülach angestellt. Diese Anlagen sind mit der getroffenen Wahl der Umrichtertechnik für die neuen Doppelstockzüge nicht mehr erforderlich. Die Verbraucher im Bahnstromnetz S-Bahn Zürich stellen gesamthaft elektrisch eine gemischt ohmisch-induktive Last mit stark und rasch veränderlichem Leistungsfaktor (ab Unterwerk im Durchschnitt 0,65 bis 0,85) dar. Der vermehrte Einsatz von Doppelstockzügen sowie der Einsatz von Loks Reihe 460 (Bahn 2000) bei den IC-Zügen wird eine erwünschte Anhebung dieser Werte mit sich bringen.

### Berechnungen

Bevor mit umfangreichen Berechnungen die Belastungen der einzelnen Fahrleitungsabschnitte bestimmt wurden, wurden verschiedene Schaltungskonzepte aufgestellt. Diese Konzepte hatten sich an den vorhandenen Unter-

werken zu orientieren; die neuen S-Bahn-Strecken sowie die Ausbauschritte für die Bahn 2000 waren einzubeziehen. Neben den baulichen Aspekten waren vor allem die zukünftigen Fahrplangestaltungen und Zugattungen mitzubedenken. Neben den normalen Betriebsfällen wurde darauf geachtet, bei Störungsfällen möglichst einfache zusätzliche Notspeisungsmöglichkeiten zu schaffen. Im Gegensatz zu den Netzen der öffentlichen Energieversorgung ist das 15-kV-Bahnstromnetz nur sehr weiträumig vermascht, was bei grösseren Störungsfällen zu Versorgungsschwierigkeiten führen kann.

Mit dem für die Betriebsaufnahme vorgesehenen Fahrplan und den entsprechenden Grundtakt- und Zusatzzügen wurden zahlreiche Berechnungen durchgeführt (Bild 2). Die Berechnungen erfolgten sowohl auf dem Grossrechner wie auch auf einer neu entwickelten Lösung auf einem Personal Computer [3].

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigten einerseits die Notwendigkeit, in Wetzikon, Killwangen und Eglisau neue Zwischen-Unterwerke zu erstellen, und andererseits, dass damit verbunden die Kurzschluss-Leistungen

stark ansteigen werden. Diese Schaltleistungen konnten im bis anhin üblichen Verbundbetrieb nicht mehr beherrscht werden. Neben dem Einbau von neuen, leistungsstärkeren Speisepunktschaltern (Vakuumschalter) in den Unterwerken Seebach, Zürich, Brugg, Winterthur und Rapperswil sowie in den Kuppelschaltposten musste zudem das Netz grossräumig um Zürich herum in drei Netzbereiche aufgeteilt werden: Damit entstehen die Netzbereiche Limmattal (mit total 80 MVA Unterwerksleistung), Zürichsee (100 MVA) und Glattal (80 MVA), die im Kernbereich des gemischten S-Bahn-, IC- und Güterzugsverkehrs die Bahnstromversorgung sicherstellen (Bild 3). Diese Schaltung erlaubt die im Rahmen von Bahn 2000 erforderlichen Ausbauschritte ohne grundsätzliche Änderungen.

### Ausbau der Bahnstromversorgung

#### Unterwerke und Übertragungsleitungen

Als erstes Unterwerk für die S-Bahn Zürich konnte bereits im Dezember

Unterwerksbezirke

- 1 Limmattal
- 2 Zürichsee
- 3 Glattal

- Bahnnetz**
- Unterwerk
  - ..... Stundentakt
  - Halbstundentakt
  - Drei oder mehr Züge pro Stunde
  - Intercity- und Schnellzüge
  - Übrige Bahnlagen
  - Bahnhof

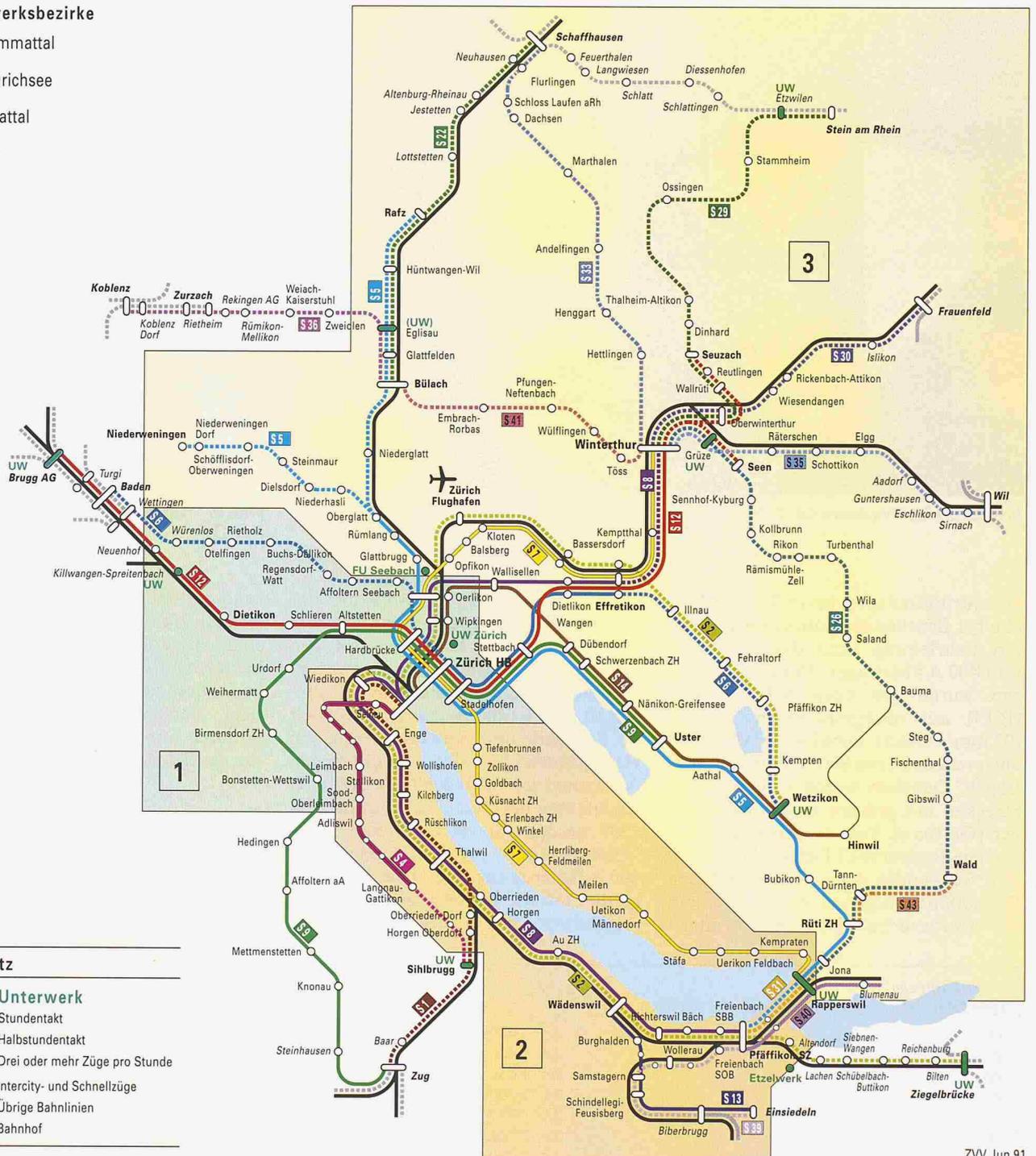


Bild 3. Bahnstrom-Netzkreise S-Bahn Zürich

ZVV Jun 91

1986 das Zwischenunterwerk Wetzikon in Betrieb genommen werden. Ober- spannungseitig konnte das Unterwerk mit einer einfachen Einschlaufung an die bereits bestehende 132-kV-Übertra- gungsleitung Rapperswil-Seebach an- geschlossen werden. Im Mai 1990 ging das Zwischenunterwerk Killwangen ans Netz. Seine Anspeisung erfolgt mit einer kurzen Stichleitung, die in eine Schleife der 132-kV-Übertragungslei- tung Brugg-Seebach geschaltet wurde. Beide neuen Zwischenunterwerke ha- ben zwei Leistungstransformatoren mit einer installierten Leistung von je 20

MVA, wobei eine Einheit als Reserve vorgesehen ist. Das Unterwerk Wetzikon ist als Freiluftanlage ausgeführt, während das Unterwerk Killwangen (Bild 4) als Innenraumanlage mit SF6-Schaltern (132 kV) und Vakuum-Schal- tern (15 kV) ausgerüstet ist. Im Sommer 1991 wird mit dem Bau des Zwischen- unterwerks Eglisau begonnen. Instal- lierte Leistung und Bauform werden in etwa dem Unterwerk Killwangen ent- sprechen. Für die Anspeisung dieses Unterwerks ist eine neue rund 20 km lange 132-kV-Übertragungsleitung See- bach-Eglisau erforderlich. Diese Lei-

tung ist auf den Abschnitten Glatt- brugg-Bülach-Glattfelden bereits fer- tiggestellt. Der Abschnitt UW Seebach- Glattbrugg wird diesen Sommer/ Herbst erstellt. Im Raum Glattfelden ist zurzeit eine Einsprache im Rahmen des Plangenehmigungsverfahrens beim Bundesrat hängig.

**Ausbau der Fahrleitungsanlagen**

Seit der Elektrifizierung der SBB wur- den mit der Normalfahrleitung (N-F1) Querschnitte von 107 mm<sup>2</sup> und 85 mm<sup>2</sup> (Nebenlinien) eingebaut. Bei diesem Fahrleitungstyp trägt das Tragseil nicht

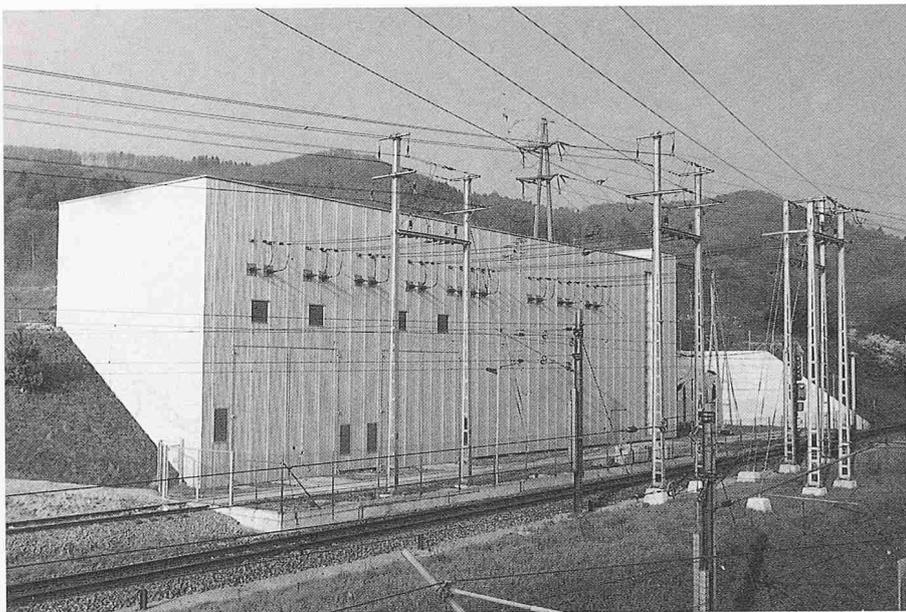


Bild 4. Zwischenunterwerk Killwangen

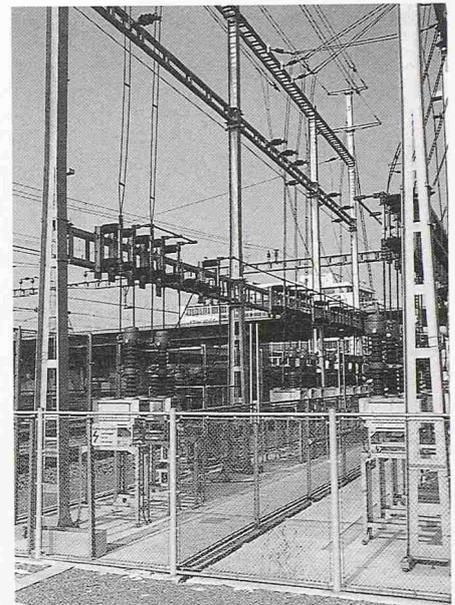


Bild 5. Lastschaltposten Zürich-Altstetten-Ost

zum Stromtransport bei (z.B. Unterbrücke bei Brückenüberführungen). Diese Art Fahrleitung kann dauernd ungefähr 400 A übertragen. Vor rund 25 Jahren wurde die neue R-Fahrleitung (R-Fl) mit nachgespanntem Tragseil (92 mm<sup>2</sup> Stacu) entwickelt; sie kann entsprechend etwa 800 A dauernd übertragen. Daneben wurde vereinzelt auf Strecken mit grossen Traktionsleistungen (Gotthard, Vorortverkehr Zürich-Meilen-Rapperswil) Fahrdrabt mit 150 mm<sup>2</sup> verwendet. Abgesehen von diesen Spezialfällen konnten bis vor kurzem die erforderlichen Traktionsleistungen

praktisch während 70 Jahren mit der N-Fl (107 mm<sup>2</sup>) genügend gut versorgt werden. Mit den heutigen IC-Zügen (mit neuen schwereren Reisezugwagen, erhöhten Zugsammelschienenleistungen für die Klimatisierung), gebündelt im Stunden- und teilweise bereits im Halbstundentakt, den vorgesehenen Ausbauten zur Bahn 2000 und der Inbetriebnahme der S-Bahn Zürich im Mai 1990 werden auf verschiedenen Streckenabschnitten pro Gleis mehr als 400 A dauernd benötigt. Dies bestimmte die erforderlichen, umfangreichen Ausbauten der Fahrleitungsanlagen

rund um Zürich. Abgesehen von der Neubaustrecke betrafen alle im Kästchen aufgeführten Projekte Totalumbauten von bereits bestehenden Anlagen. Diese von mehrheitlich SBB-eigenem Personal geleisteten Arbeiten konnten nur in den kurzen Nachtpausen des Betriebs ausgeführt werden.

Durch die volle Ausnutzung des Lichtraumprofils durch die neuen Doppelstockwagen mussten an vielen Stellen des S-Bahn-Netzes bei Tunneln und Brücken punktuell Anpassungen an den Fahrleitungsanlagen vorgenommen werden. Insbesondere mussten die Fahrleitungsanlagen im Enge- und Ulmbergtunnel total umgebaut und durch eine Stromschienen-Fahrleitung ersetzt werden. Zusätzlich musste im Bereich der Sihlunterquerung die Fahrbahn auf einigen hundert Metern abgesenkt werden.

Neben dem Ausbau der Fahrleitungen von über 120 km Länge mussten gleichzeitig entsprechende Aus- und Neubauten von 15-kV-Speise- und Umgehungsleitungen vorgenommen werden. Die verlegten Längen betragen für Freileitungen 75 km und für Hochspannungskabel 55 km, wovon allein 16 km auf der Neubaustrecke.

Die Aufteilung der Fahrleitungsanlagen im Störungsfall und für Unterhaltsarbeiten erforderte den Bau (zum Teil Totalumbauten von bereits bestehenden Anlagen) von verschiedenen Lastschaltposten: Oerlikon, Wallisellen, Neugut, Stadelhofen, Museumstrasse, Wiedikon, Hardbrücke, Altstetten-West und Altstetten-Ost (Bild 5).

<i>R-Fl-Doppelspur</i> (pro Gleis 107 mm <sup>2</sup> Cu Fd, 92 mm <sup>2</sup> Ts Stacu)		
Dietikon-Killwangen	2× 3 480 m	6 960 m
Zürich PB-Altstetten (alt)	2× 1 400 m	2 800 m
Zürich PB-Altstetten (2. Dsp)	2× 1 650 m	3 300 m
Zürich-Stettbach-Dietlikon	2× 11 500 m	23 000 m
Stettbach-Dübendorf	2× 950 m	1 900 m
Doppelspurinsel Urdorf	2× 2 100 m	4 200 m
Doppelspurinsel Hedingen-Affoltern	2× 2 280 m	4 560 m
Doppelspurinsel Aathal-Wetzikon	2× 3 120 m	6 240 m
Doppelspurinsel Rapperswil-Jona	2× 1 170 m	2 340 m
Oerlikon-Wallisellen-Hürlistein	2× 6 545 m	13 090 m
Bülach-Glattfelden-(Eglisau)	2× 4 370 m	8 740 m
	<b>Total</b>	<b>77 130 m</b>
<i>R-Fl-Einspur mit Hilfsleitung</i> (107 mm <sup>2</sup> Cu Fd, 92 mm <sup>2</sup> Ts Stacu, 2×95 mm <sup>2</sup> Cu Hilfsleitung)		
Altstetten-Affoltern-Zug		24 000 m
Uster-Aathal		4 000 m
Wetzikon-Bubikon-Rüti		7 100 m
	<b>Total</b>	<b>35 100 m</b>
<i>Feeder/Querschnittsverstärkungen N-Fl</i> (107 mm <sup>2</sup> Cu Fd, 50 mm <sup>2</sup> Ts Stacu, Feeder 95 mm <sup>2</sup> Cu)		
Zürich-Wipkingen-Oerlikon	2× 3 150 m	6 300 m
Altstetten-Hard	1.150 m	1 150 m
	<b>Total</b>	<b>7 450 m</b>

Tabelle 1. Ausbau 15-kV-Fahrleitungsanlagen in den Jahren 1985-1990

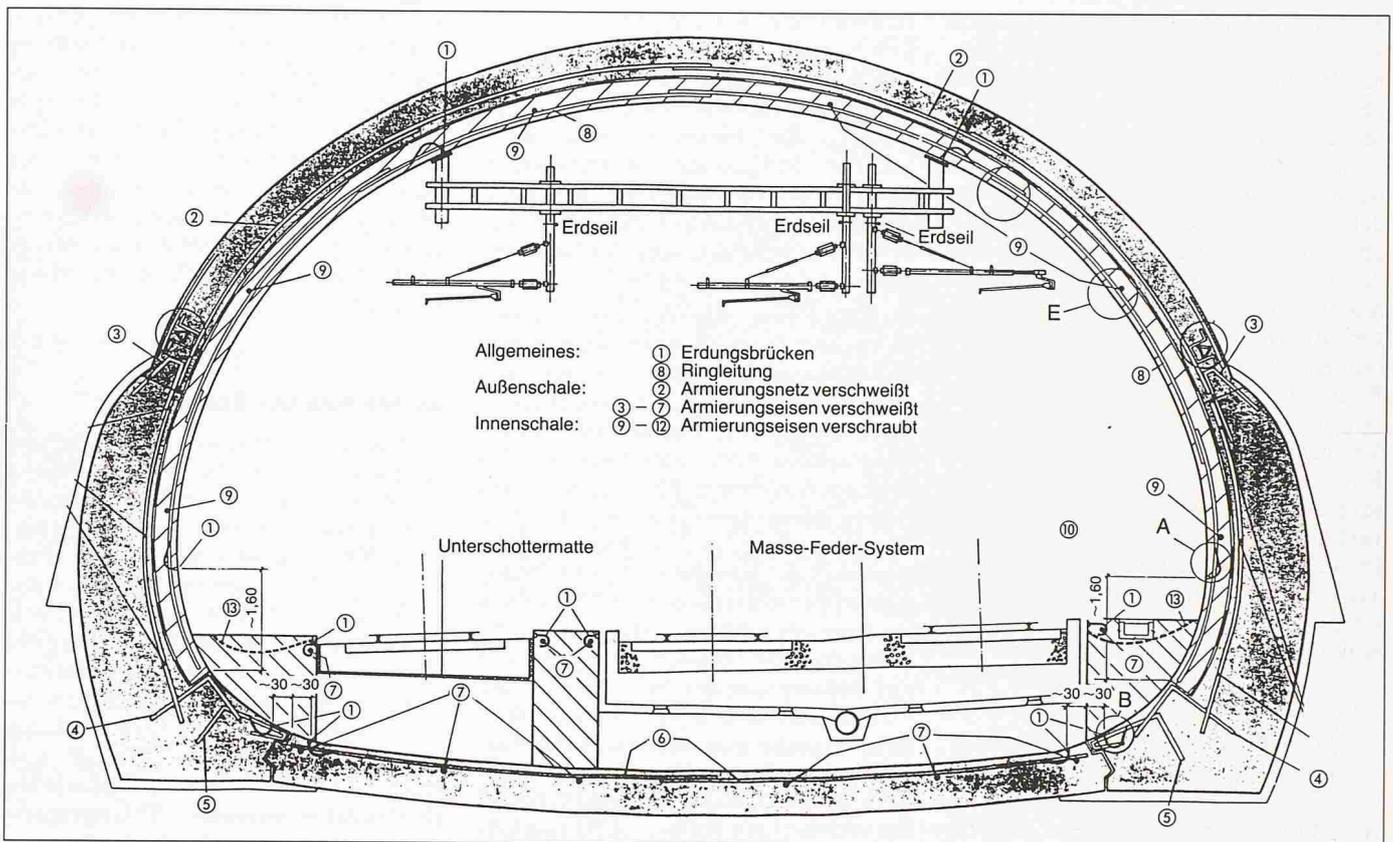


Bild 6. Erdungskonzept Neubaustrecke

### Besondere Aspekte der Neubaustrecke

#### Erdungs- und Beeinflussungsfragen

##### Anforderungen

Die vielen Kunstbauten (Brücken, Tunnel) der Neubaustrecke [4], die eine andere Erdfähigkeit als Gleise im freien Gelände aufweisen und die teilweise sehr nahe an bestehenden Häusern und deren Einrichtungen vorbeiführen, verlangten ein gut abgestimmtes Erdungskonzept. Dabei geht es um die Gesamtheit der Massnahmen, die bei den Bahn-, Bauwerk- und Wassererden getroffen werden können.

Da ein S-Bahn-Zug mit drei Einheiten bei Geschwindigkeiten über 50 km/h Wirkleistungen von nahezu 12 MW aufnimmt und die Zugfolgezeiten kurz sind, fließen entsprechend grosse Fahrleitungsströme, die gezielt den Unterwerken zurückgeführt werden müssen. Neben den einschlägigen Verordnungen über elektrische Schwachstrom- und Starkstromanlagen sind die entsprechenden Anforderungen in der VEAB [5] festgehalten.

Der Streckenabschnitt Stadelhofen-Museumstrasse liegt stark im Einflussbereich der Streuströme der VBZ: Grössere Traktionsleistungen der modernen

Strassenbahnzüge verbunden mit der kleinen Fahrleitungsspannung von 600 V Gleichspannung führen zu grossen Streuströmen. Die Richtlinien zum Schutz gegen Korrosion durch Streuströme [6] sind in der Projektierung und Bauausführung vollumfänglich berücksichtigt worden.

##### Beeinflussungsprobleme

Im Kernbereich können auf einzelnen Speiseabschnitten über 20 gleichzeitig arbeitende S-Bahn-Lokomotiven stehen oder fahren. Wenn auch die Störwirkung des einzelnen neuen Triebfahrzeuges vergleichsweise sehr klein ist, so entstehen durch eine praktisch lineare Addition (Messungen SBB vom Januar und Mai 1990) der einzelnen Störströme Werte, die im Erdungskonzept berücksichtigt werden müssen. Neben der Stromzuführung über die eigentlichen Fahrleitungen, die durch die Gleislage gegeben ist, wurden in den Tunnelstrecken die Hochspannungskabel (15 kV) konsequent getrennt von den Niederspannungs- und Fernmeldekabeln auf der einen Seite der Gleise verlegt. Durch ein neues besonderes Erdungskonzept dieser einphasig betriebenen Hochspannungskabelanlage (Länge gegen 20 km) wird ein grosser Anteil des Rückstromes gezielt über isolierte Erdrückstromleiter geführt, so dass die Beeinflussungen reduziert werden (Messungen SBB vom Januar 1990) können.

##### Vermaschung von Bahn- und Bauwerkserde

Das Konzept zur eigentlichen Erdung musste frühzeitig mit allen betroffenen Bau- und Elektroingenieuren festgelegt werden, da ein Teil der Massnahmen bereits in der Rohbauphase bis in alle Einzelheiten bearbeitet werden musste. Wenn auch das Grundkonzept einer möglichst guten Vermaschung der beiden Erden von allen anerkannt wurde, so mussten viele Einzelheiten baulosweise unterschiedlich gelöst werden. Dies ergibt sich aus den verschiedenen Tunnelquerschnitten (Einspur, Doppelspur, runde, eckige Profile usw.) und den verschiedenen Rohbauausführungen.

Auf der ganzen Neubaustrecke wurden im Rahmen der Bahnerde folgende Massnahmen getroffen: Durchgehende Erdseile (95 mm<sup>2</sup> Cu) pro Gleis unter besonderer Berücksichtigung des Standortes für ein fahrbares Unterwerk 132 kV/15 kV im Neugut sowie Verstärkung der Erdseile im Bahnhof Zürich (Rampe/Vorbahnhof). Durch den Einbau von Tonfrequenz-Gleisstromkreisen für die Stellwerktechnik entfallen die Gleisstösse zur Isolierung der einzelnen Gleisabschnitte. Neben der günstigen Wirkung betreffend Lärm und Erschütterungen können deshalb für die Rückstromführung alle Schienen uneingeschränkt verwendet werden. Zur wirksamen Begrenzung von

Schritt- und Berührungsspannungen auf zulässige Werte wurden auf der ganzen Neubaustrecke auf der Aussenseite der Gleise Bänder der verlegt. Erdseile, Schienen und Bänder der werden durchschnittlich alle 100–150 m mit Ringleitungen miteinander verbunden. Neben den vorgeschriebenen Erdungen der Signale, Fahrleitungstragwerke usw. auf der freien Strecke und auf Stationen musste im Stationsbereich zusätzlich geprüft werden, welche Perroneinrichtungen im Publikumbereich an die Bahnerde angeschlossen werden müssen. Insbesondere auf den Stationen Stettbach und Stadelhofen sind die Schnittstellen betreffend 50-Hz-Versorgung (Trennung bzw. gezielte Erdverbindungen) von grosser Bedeutung. In Stettbach wurde zudem eine klare Trennung zwischen dem VBZ-Gleichstromsystem und den übrigen elektrischen Anlagen realisiert. Dies ist bei den Stationen Stadelhofen und Museumstrasse wegen der bereits bestehenden Gebäude und Einrichtungen in unmittelbarer Nähe der Neubauten nicht möglich.

Als Massnahmen gegen Lärm und Erschütterungen [7] wurden die Gleise teilweise auf Unterschottermatten oder auf Masse-Feder-Systemen verlegt. Die verwendeten Materialien sind elektrisch isolierend, so dass zusätzliche Erdungsmassnahmen erforderlich waren: die Armierungen der einzelnen Blöcke des Masse-Feder-Systems sind einzeln mit der Bahnerde verbunden.

*Gleichstrom-Streuströme*

Besondere Erdungsmassnahmen wurden dort erforderlich, wo besondere Gefährdungen der Bausubstanz durch Gleichstromstreuströme zu beachten sind. Durch die Lage des VBZ-Strassenbahnnetzes und der zugehörigen Gleichrichterstationen Drahtzug, Hohe Promenade, Haldenegg, Shopville liegen die Abschnitte Stadelhofen-Central und der Bahnhof Museumstrasse im Bereich der austretenden Streuströme. Je nach Ausführungsart der Aussen- und Innenschale in den einzelnen Bauwerksabschnitten in den Tunnels wurden ausgewählte Armierungseisen in Längs- und Querrichtung gezielt ver-

schraubt oder verschweisst und durch den Einbau von sogenannten Erdungsbrücken an die Oberfläche geführt. Mit diesen Anschlusspunkten können einerseits die einzelnen Betonierabschnitte miteinander kontinuierlich längsverbunden werden und andererseits gezielte Verbindungen zu den früher erwähnten Ringleitungen der Bahnerde realisiert werden.

Damit ist eine enge Vermaschung von Bahn- und Bauwerkserde möglich, womit insbesondere die Streuströme anteilig weniger durch das Bauwerk fliessen. Um die Streuströme gezielt aus dem Erdungssystem herauszuführen, wurden folgende gerichtete Drainagen vorbereitet: Rämistrasse, Florhof, Central, Museumstrasse und Zollbrücke. Ihr Einfluss auf die Rückstromführung wurde mit umfangreichen Messungen im Dezember 89 erstmals erprobt. Die Beschaltungen mussten – insbesondere zur Bedämpfung der 16 2/3 Hz-Ströme – anschliessend angepasst werden. Weitere Versuche und Berechnungen wurden 1990 durchgeführt, wobei festgestellt wurde, dass die Längsleitfähigkeit der vermaschten Bahn- und Bauwerkserden sehr gross ist. Deshalb wird vorläufig auf den Anschluss der Drainageleitungen verzichtet.

Die weit über 1000 in der Stützmauer des Bahnhofs Stadelhofen und im Bahnhof Museumstrasse versetzten Anker sind besonders korrosionsgeschützt und haben keine Verbindungen zur Bauwerk- bzw. Bahnerde [8].

Durch eine Vielzahl von gezielt getroffenen Massnahmen konnte trotz den

unterschiedlich gestalteten Bauabschnitten ein klares Erdungskonzept realisiert werden (Bild 6). Damit können die verschiedenen Anforderungen betreffend Rückstromführung, Berühr- und Schrittspannungen, allgemeiner Beeinflussung sowie Korrosionsschutz erfüllt werden. Die genauen Verhältnisse wurden Anfang 1990 durch umfangreiche Messungen ermittelt und erfolgreich überprüft.

**Stromschienen-Fahrleitung**

Im neuen viergleisigen, unterirdischen Bahnhofsteil von Zürich PB können mit Zugfolgezeiten von 150 Sekunden in den Spitzenzeiten stündlich gleich viele Züge verkehren wie auf den oberirdischen 16 Gleisen des Kopfbahnhofes. Im neuen Bahnhofsteil würden sich somit Störungen an der Fahrleitung besonders stark auswirken: neben der entsprechenden feingegliederten Sektoreinteilung wurde zur Vereinfachung der Fahrleitungsanlage (Wegfall von vielen Gleistrennern, einfacheres Drahtwerk, weniger Abfangungen) eine Stromschienen-Fahrleitung montiert (Bild 7). Die Mehrkosten dieser Anlage gegenüber der herkömmlichen Fahrleitung können durch reduzierten Unterhalt und weniger Störungen wirtschaftlich begründet werden. Der Entscheid zum Einbau der Stromschienen-Fahrleitung aus Gründen der Zuverlässigkeit und Ausfallbetrachtungen fiel nach dem Baubeginn des Rohbaues; damit konnte bei diesem Projekt keine Tunnelbauhöhe eingespart werden.



Bild 7. Profil Stromschienen-Fahrleitung

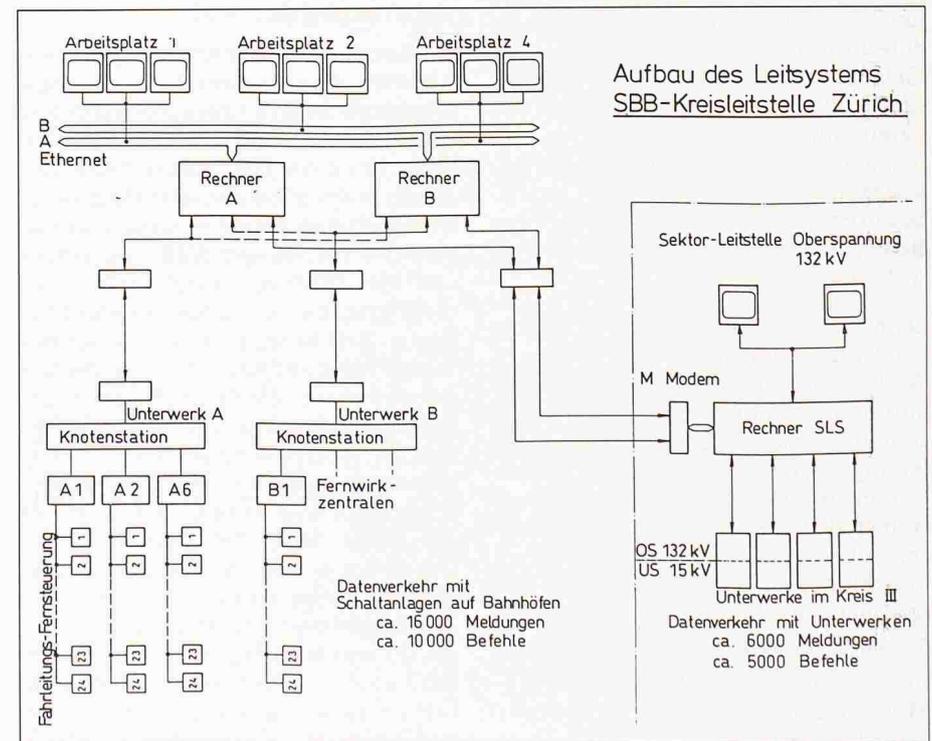


Bild 8. Aufbau Leitsystem Bahnstromversorgung Kreis III

### Leitstelle der Bahnstromversorgung Kreis III

Das Fahrleitungsnetz der SBB wird mit einer Spannung von 15 kV und einer Frequenz von 16 2/3 Hz betrieben. Ein gutes Dutzend Unterwerke liefern im Kreis III die für den elektrischen Betrieb nötige Energie. In nahezu allen Stationen sind Hochspannungs-Schaltanlagen, sogenannte Schaltposten, für die Energieverteilung installiert.

Diese Schaltposten werden von 6 Unterwerken aus über Fernwirkanlagen fernüberwacht und fernbedient. Mit Hilfe dieser Fernsteueranlagen werden Schaltungen für Bau- und Unterhaltsarbeiten ausgeführt. Dies wird von stets grösser werdender Bedeutung, weil immer mehr Stationen unbedient sind und die Zeitintervalle für Unterhaltsarbeiten laufend noch kürzer werden. Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Lokalisierung und Abtrennung von Störungen. Auf dem Fahrleitungsnetz sind Störungen im Vergleich zum Landesversorgungsnetz recht häufig; dies ist begründet durch die starke mechanische Beanspruchung des Fahrdrahtes und die grosse Ausdehnung des Netzes. In den Fernwirkzentralen sind grosse Mosaiktafeln eingebaut, auf welchen das zu speisende Fahrleitungsnetz dargestellt ist.

### Planung und Systemwahl einer Kreisleitstelle

Die grösste Fernsteuertafel in den bestehenden Netzwarten misst 24 m in

<b>System:</b>	vollgrafisches Leitsystem LS 3200 (Landis & Gyr AG, Zug)
<b>Hardware:</b>	Doppelrechnersystem DEC MicroVAX 3600
	4 Leitplätze mit je:
	- 3 VAXstation 3100 (davon 1 mit Diskettenlaufwerk)
	- 3 vollgrafische 19"-Bildschirme
	- 1 alphanumerische Tastatur
	- 1 Maus
	- 1 Umschaltbox für die Workstations
	zentral für die ganze Leitstelle:
	- Matrixdrucker
	- Laserdrucker
	- Hardcopy-Gerät
<b>Betriebsarten:</b>	- Prozessüberwachung
	- Prozessführung
	- Testbetrieb
	- Simulation
	- Systempflege

Tabelle 2. Kreisleitstelle Bahnstromversorgung Kreis III

der Länge. Eine klare Übersicht ist damit nicht mehr gewährleistet - die Grenzen dieser Technik sind erreicht. Dazu kommt, dass der grösste Teil der Netzwarten bis heute nur während der normalen Arbeitszeit besetzt ist. Mit dem starken Ausbau der Bahnanlagen und der stetig zunehmenden Dichte des Zugverkehrs (S-Bahn, Huckepack, Bahn 2000) ist diese Arbeitsweise nicht mehr der Situation angepasst. Ausserdem hat die Direktion Kraftwerke im Jahr 1987 beschlossen, für die Ober- und Unter- Spannungsebenen 66 kV und 132 kV ebenfalls ein Leitstellensystem aufzubauen. Die Arbeitsgruppe für Fahrleitungs-Steueranlagen, bestehend aus Vertretern aller drei Kreise und unter der Leitung der Generaldirektion, hat die Probleme gründlich studiert und ist zum Schluss gekommen, dass technisch und wirtschaftlich die beste Lösung im Bau je einer zentralen Leitstelle pro Kreis besteht. Damit ist eine optimale Koordination aller Aktivitäten im Fahrleitungsnetz gewährleistet. Dies gilt insbesondere bei Störungen, aber ebenso für die planmässigen Schaltungen bei Wartung und Unterhaltsarbeiten. Gemeinsam ist ein ausführliches Pflichtenheft für die im Vergleich zum Netzbetrieb der öffentlichen Werke etwas besonders gearteten Anforderungen ausgearbeitet worden. Alle eingegangenen Angebote sind gründlich geprüft und einem umfassenden Bewertungsverfahren unterzogen worden. So waren z.B. die folgenden Punkte von wesentlicher Bedeutung:

- Anteil vorhandener Standardsoftware,
- Erweiterbarkeit des Systems,
- Möglichkeit, Netzteile zu ändern,
- Wirtschaftlichkeit des Systems.



Bild 9. Übersicht Wartenraum Kreisleitstelle

### Projektorganisation und Projekt- ablauf

Ende 1988 hat die Generaldirektion der SBB das Leitstellenprojekt genehmigt und den erforderlichen Kredit bewilligt. Nachdem der Vertrag zwischen Lieferant und SBB abgeschlossen war, wurde ein Arbeitsteam für die Projektleitung gebildet. Es bestand aus Mitarbeitern von Landis & Gyr und SBB. Zuerst wurde gemeinsam ein Realisierungspflichtenheft ausgearbeitet, in welchem die Anforderungen und speziellen Bedingungen des Projektes festgelegt wurden.

Vom Vertragsabschluss Februar 1989 bis zur Inbetriebsetzung Ende Februar 1991 hat die Abwicklung des ganzen Projektes rund 24 Monate gedauert. Erfreulicherweise konnten Terminplan und Kostenrahmen gut eingehalten werden.

Die ganze Anlage (Bild 8) wird wegen der Bereitstellung der Aussenanlagen etappenweise in Betrieb genommen. Zuerst ist der Versorgungsbereich des Unterwerkes Seebach von der Leitstelle übernommen worden. Dies entspricht rund einem Drittel des ganzen Fahrleitungsnetzes des Kreises III. Als nächste Netzteile folgen die Bereiche Winterthur und Gossau, welche die ganze Nordostschweiz umfassen.

Ein Ingenieur der SBB hat seit Mitte 1989 aktiv bei der Software-Erstellung mitgearbeitet. Als sehr nützlich hat es sich erwiesen, dass schon früh die zukünftigen Operateure der Leitstelle in das Projekt einbezogen worden sind. Sie haben die Objektdaten in die Datenbank eingegeben, bei der Erstellung der Anlagenbilder und beim Einzeltest der Informationen mitgearbeitet. Da-

mit haben sie sich mit der Arbeitsweise am Bildschirm vertraut machen können und schon viele Einblicke in das neue Leitsystem gewonnen, bevor die Anlage in Betrieb gesetzt worden ist.

### Fernsteuerung der Schaltposten

Für den Betrieb des Fahrleitungsnetzes sind im Kreis III der SBB rund 350 Fernsteuer-Aussenstellen eingesetzt. Es versteht sich von selbst, dass es weder wirtschaftlich noch technisch möglich war, die ganzen Fernwirkanlagen kurzfristig zu ersetzen, obschon die Anlagen zum Teil seit 20 Jahren in Betrieb stehen. An jeder Fernwirkzentrale bzw. Fernsteuerlinie können bis maximal 24 Unterstellen angeschlossen werden. In grossen Speisebereichen werden bis zu 6 solche Fernwirkzentralen eingesetzt. Zur Anpassung der bestehenden Relaisfernsteuerungen an die Rechneranlage der Leitstelle werden sog. Knotenstationen eingesetzt. Sie setzen die Fernsteuertelegramme von bis zu 8 Fernsteueranlagen in ein rechnerkonformes Protokoll um. Diese Informationen werden über eine V24/V28-Schnittstelle an die Übertragungseinrichtung weitergeleitet.

Die Rechneranlage der Leitstelle ist bereits so ausgelegt, dass der Anschluss moderner Fernwirksysteme problemlos erfolgen kann.

### Fernsteuerung der Unterwerke

Zum 15-kV-Bahnstrom-Versorgungsnetz gehören nicht nur die Schaltposten auf den Stationen, sondern auch der Unterspannungsteil sämtlicher Unterwerke. Dazu zählen: Sammelschienen 15 kV, Trenner, Leistungsschalter (Speisepunktschalter), Prüfeinrichtungen und Streckenabgänge mit den Streckenschaltern. Sämtliche Befehle, Meldungen und Messwerte über diesen Teil der Unterwerke werden an einer Rechnerschnittstelle bei der Sektorleitstelle (Leitstelle der Direktion Kraftwerke für die Oberspannungsverteilung) übergeben. Diese Schnittstelle ist über eine Modemverbindung an die Kreisleitstelle angekoppelt.

### Rechneranlage

Ein leistungsfähiges Doppelrechnersystem (DEC Micro VAX 3600) sichert eine grosse Betriebssicherheit für die Bahnstromversorgung. Die Leitstelle arbeitet an einem der Hauptrechner; der andere Rechner ist in den HSB-Betrieb (Hot Stand By) geschaltet. Im Störfälle wird automatisch auf den anderen Rechner umgeschaltet. Die Informationen von den Fernsteueranlagen werden von einem redundanten Frontend-Rechnersystem übernommen und von dort an die Hauptrechner weitergeleitet.

Alle Rechner und Peripheriegeräte sind über ein Local Area Network (LAN) miteinander verbunden. Aus Sicherheitsgründen ist dieses LAN in zwei unabhängige Teile getrennt, welche durch einen Repeater zusammenschaltet sind. Die Leitstelle wird über eine USV-Anlage aus dem öffentlichen Netz gespeist. Eine Batterie sichert den Betrieb auch bei längerem Stromausfall. Genau wie beim Datensystem so ist auch die Stromversorgung durch zwei parallele USV-Anlagen in zwei Teilsysteme aufgetrennt. Die ganze Anlage mit Hauptrechner, USV, LAN-Datenetz, Arbeitsplätzen ist konsequent auf diese zwei Teilsysteme aufgeteilt.

### Kommandoraum

Der Kommandoraum ist mit 4 Leitplätzen ausgerüstet (Bild 9). Drei dieser Leitplätze sind für die Betriebsführung vorgesehen. Der vierte Leitplatz dient dem Systembetreuer für die Datennachführung, Bildkonstruktion und Operateurenausbildung. Dieser Platz kann aber im Notfall auch für die Betriebsführung eingesetzt werden. Alle vier Leitplätze sind genau gleich ausgerüstet. Der Dialog erfolgt ausschliesslich über das Menu, d.h. mittels Maus und Bildschirm, deshalb konnte auf eine Betriebsführungstastatur verzichtet werden. Das ganze System ist sehr flexibel gestaltet, auf jedem Arbeitsplatz und jedem Bildschirm können alle Bilder aufgerufen und alle Funktionen ausgeführt werden. Dem Instruktions- bzw. Datenpflegeplatz ist eine Grossprojektion zugeordnet. Sie dient der Instruktion und als Koordinationsmittel bei grösseren Störungen. Die Drucker werden aber nur bei Bedarf eingesetzt - es erfolgt kein automatischer Ausdruck. Ein Mosaikbild, worauf alle Unterwerke und Leistungsschalter dargestellt sind, dient den Operateuren als grobe Übersicht. Es sind auf diesem Bild jedoch keinerlei aktive Meldeelemente eingebaut.

### Software

Von der Leitstelle aus wird ein sehr grosses Netz geführt und überwacht, deshalb sind die folgenden Grundforderungen von grösster Bedeutung:

- klare, permanente Übersicht über das ganze Bahnstromnetz,
- durch Bildschirmmenüs geführte, schnelle und fehlersichere Bedienung,
- durch klare Systembilder laufende Orientierung über den Zustand der Fernwirk- und Rechneranlagen.

Das Fahrleitungsnetz muss laufend den betrieblichen Erfordernissen angepasst und entsprechend umgebaut und erweitert werden. Es ist darum wichtig, dass

### Literatur

- [1] Mitteilungen der Schweizerischen Studienkommission für elektrischen Bahnbetrieb Nr. 4: Die Systemfrage und die Kostenfrage für den hydroelektrischen Betrieb der schweizerischen Eisenbahnen, 1912
- [2] Studer, Kobi, Streiff, Übriges Rollmaterial der S-Bahn, «Schweizer Ingenieur und Architekt», Heft 29/91, Seite ...
- [3] Lörtscher, Maurer, Würzler, FABEL86-Fahrleitungsbelastung - Berechnung mit einem Personal Computer, Verkehrstechnik in der Schweiz, Band 22, 1988
- [4] P. Hübner, Die Neubaustrecke im Überblick, «Schweizer Ingenieur und Architekt», Heft 21/90, 1990
- [5] Verordnung über elektrische Anlagen von Bahnen («VEAB»)
- [6] Richtlinien zum Schutz gegen Korrosion durch Streuströme von Gleichstromanlagen, SEV-Korrosionskommission Dok C3 d Ausgabe 1981
- [7] Rubi, et al, Gleisoberbau, «Schweizer Ingenieur und Architekt», Heft 29/91, 1991, Seite ...
- [8] SIA-Dokumentation D 031 Korrosion und Korrosionsschutz Teil 4: Anker und Spannkabel (9. März 1989) H

Datennachführung und Bildkonstruktion den laufenden Betrieb nicht beeinträchtigen und auf einfache Art vom eigenen Personal gemacht werden können.

Zur Verhinderung unerwünschter Eingriffe sind alle Arbeitsplätze durch Passwortkontrolle gesichert. Jeder einzelne Arbeitsplatz kann entsprechend der Zutrittsberechtigung des Operateurs in eine genau definierte Betriebsart geschaltet werden. Für die Betriebsführung stehen weitere Hilfsmittel zur Verfügung, so z.B.

- Topologieprogramm: Markierung der Fahrleitungsabschnitte abhängig vom Spannungszustand,
- Schnappschussfunktion: Einfrieren von ausserordentlichen Netzzuständen für die spätere Analyse,
- Notizbuch: Festhalten von Notizen über die Betriebsführung für die nächste Operateurschicht,
- Journalauszüge: Erstellen von definierten Listenauszügen,
- Hilfemenüs.

Adresse der Verfasser: M. Lörtscher, dipl. El-Ing. ETHZ, Sektionschef Elektrische Anlagen, H. Nussberger, Ing. HTL, Bereichsleiter Bahnstromversorgung, SBB Bauabteilung Kreis III, Postfach, 8021 Zürich.