

DIE UMFORMERWERKE FÜR DEN ELEKTRISCHEN ZUGBETRIEB DER SCHWEDISCHEN STAATS-EISENBAHNEN

DIE UMFORMERWERKE FÜR DEN ELEKTRISCHEN ZUGBETRIEB DER SCHWEDISCHEN STAATSEISENBAHNEN



VON DIREKTOR

DER SCHWEDISCHEN STAATSEISENBAHNEN

IVAN ÖFVERHOLM

STOCKHOLM

Centraltryckeriet Esselte ab. Stockholm 1936 606686

Die Umformerwerke für den elektrischen Zugbetrieb der Schwedischen Staatseisenbahnen.

Die Elektrisierung der Schwedischen Staatseisenbahnen ist mit Einphasenstrom von 16 000 Volt Fahrdrahtspannung und 16²/₃ Hertz ausgeführt, Bild 1. Als einer der grössten Vorteile dieses Systems wurde früher immer hervorgehoben, dass die elektrische Energie für die Versorgung der Bahn unmittelbar in den Kraftwerken erzeugt und durch besondere, nur dem Bahnbetrieb dienende Fernleitungen dem Bahnnetz zugeführt werden kann, wodurch man die bestmögliche Betriebssicherheit erhalten müsse. Die Elektrisierung der Bahn Luleå—Riksgränsen, der sogenannten Erzbahn, wurde daher gemäss diesem System ausgeführt. Aber die Zeit verging, und das unabhängige System für den Bahnbetrieb — das man auch bei vielen Einphasen-Elektrisierungen im Auslande verwendet hatte — wurde von verschiedenen Seiten einer scharfen Kritik unterzogen. Einige Kritiker behaupteten z. B. spasshaft, es könnte kaum eine höhere Absicht sein, dass die Erde wie ein Stachelschwein aussehen sollte - ein Satz Fernleitungen wäre mehr als genug. Die Betriebssicherheit der grossen Drehstromübertragungsnetze hatte sich auch so verbessert, dass sie wenig zu wünschen übrig liess, und im Falle, dass der erforderliche Einphasenstrom mittels synchroner Umformer entnommen würde, könnte man auch eine wertvolle Möglichkeit zur Spannungsregelung der Drehstromnetze erhalten. Andere Kritiker meinten, man backe ja nicht sein Brot selbst, wenn man es billiger im Geschäft kaufen könnte. Die von den Drehstromnetzen verfügbare elektrische Energie müsste in den meisten Fällen sich viel billiger stellen als der Einphasenstrom, der nur für den Bahnbetrieb erzeugt wird — so viel billiger in der Regel, dass die Kosten der Umformung mehr als gedeckt würden.

Einige Umstände sprachen aber immer noch gegen die Verwendung der Umformung für die Versorgung der Bahn mit dem erforderlichen Einphasenstrom. Ein Ausschuss von Sachverständigen, der in Schweden im Jahre 1918 eingesetzt wurde zur Untersuchung, wie die Störungen in den Fernmeldeleitungen bei Einphasenbahnen am besten vermieden werden können, hatte in seinem Gutachten unter anderem angegeben, dass der Abstand zwischen den Speisepunkten des Bahnnetzes aus Störungsrücksichten 30 bis 40 km nicht übersteigen dürfte. Da aber jeder Speisepunkt aus mehreren Gründen aus einem Umformerwerke bestehen sollte, würde ihre Anzahl zu gross werden. Die Entnahme des Einphasenstromes aus dem Drehstromnetz durch Umformung bringt den Vorteil, dass die Spannung an den Speisepunkten unverändert auf 16 000 Volt gehalten werden kann. Deswegen sollte für die schwedischen Verhältnisse der aus Wirtschaftsgründen geeignete Abstand zwischen den Umformerwerken 100 bis 150 km betragen, falls die Störungen in den Fernmeldeleitungen nicht Hindernisse in den Weg legen würden. Die Störungsfrage erhielt im Jahre 1923 ihre endgültige Lösung, nachdem die Schwedischen Staatsbahnen in den Jahren vorher eine erfolg-

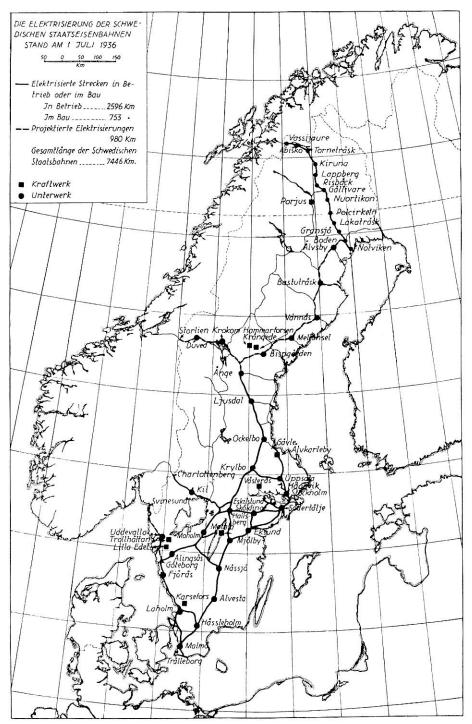


Bild 1. Karte von Schweden mit den Staatseisenbahnen.

reiche Forschungsarbeit auf diesem Gebiete durchgeführt hatten. Durch die Anordnungen, die auf Grund der Untersuchungsergebnisse zur Beseitigung der Störungen ausgeführt wurden, war es nicht länger nötig, den Abstand zwischen den Umformerwerken zu beschränken. Ein Abstand bis zu 160 km Länge und sogar eine sogenannte einseitige Speisung bis zu derselben Länge ist deswegen im praktischen Betrieb ohne Störungen durchgeführt. Dadurch sind auch besondere Drehstromleitungen für die Speisung der für den Bahnbetrieb erforderlichen Umformerwerke unnötig geworden, weil diese Werke in den meisten Fällen unmittelbar an den durch das Land führenden Drehstromleitungen angeschlossen werden können. Dies hat selbstverständlich eine verbilligende Wirkung ausgelöst und dazu beigetragen, dass die Herstellung des einphasigen Bahnstroms durch Umformung von Drehstrom wirtschaftlich geworden ist.

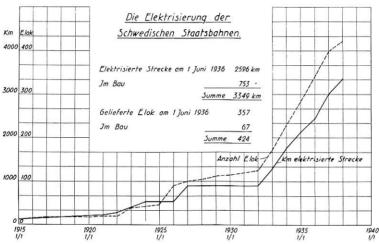


Bild 2. Entwicklung der Staatsbahnelektrisierung in den Jahren 1915—1938.

Am Anfang des elektrischen Betriebes bei der Erzbahn waren die Fahrleitungen durchgehend zusammengeschaltet teils wegen des Spannungsabfalles, teils wegen der Fernmeldestörungen. Hiermit sollte der Vorteil erreicht werden, dass der Strom von zwei Seiten zugeführt wird, wenn eine elektrische Lokomotive sich zwischen zwei Speisepunkten des Fahrdrahtnetzes befand, die in diesem Falle Umspannwerke waren. Zwei Stromkreise entstehen dabei, deren induktive Wirkungen für die Fernmeldeleitungen sich aufheben sollten. In der Tat hat sich diese gute Idee nicht genügend bewährt, und es hat sich auch gezeigt, dass die Kurzschlusströme des Bahnnetzes infolge der hohen Fahrdrahtspannung in hohem Grade störend wirkten. Nach kurzer Zeit wurden infolgedessen die Fahrleitungen in der Mitte zwischen zwei Umspannwerken aufgeteilt, wonach die Betriebsverhältnisse voll befriedigten. Der Spannungsabfall im Fahrdrahtnetz wurde dabei zwar etwas vergrössert und die Kompensation der Fernmeldestörungen fiel weg. Diese Kompensation wurde jedoch, wie schon erwähnt, später durch wirkungsvollere Anordnungen ersetzt.

Vor der Ausführung der Elektrisierung waren bei der Erzbahn keine Übertragungsleitungen für hochgespannten Drehstrom vorhanden, weil es keine bedeutende Abnehmer von elektrischem Strom längs dieser Bahnstrecke gab, mit Ausnahme der Erzbetriebe bei Kiruna und Gällivare. Für die Strecke Stockholm—Göteborg waren die Verhältnisse ganz andere, als im Jahre 1920 der Elektrisierungsvorschlag dieser Strecke zum erstenmal der

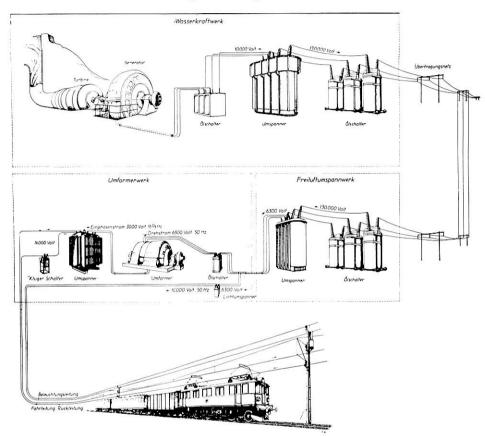


Bild 3. Schema der Energielieferung für die Schwedischen Staatsbahnen südlich von Ånge.

Regierung vorgelegt wurde. Viele hochgespannte Drehstromleitungen waren schon damals längs dieser Bahnstrecke vorhanden, und mehrere sollten gemäss den Plänen in den nächsten Jahren entstehen.

Im ersten Entwurf für die Ausführung der Elektrisierung Stockholm—Göteborg vom Jahre 1920 hatte die Generaldirektion der Schwedischen Staatsbahnen noch damit gerechnet, dass wie bei der Erzbahn der erforderliche Einphasenstrom unmittelbar im Kraftwerk erzeugt und durch besondere Hochspannungsleitungen dem Bahnnetz zugeführt wird. Wie bei der Erzbahn sollten auch Umspannwerke in einem Abstand von 30 bis 40 km längs der Bahn für die Abspannung des hochgespannten Einphasenstromes auf die für das Bahnnetz erforderlichen 16 000 Volt gebaut werden.

Dagegen hat die Schwedische Wasserkraftdirektion Einwendungen erhoben. Es sei mit grossen Schwierigkeiten und Kosten verknüpft, die Kraftwerke zu diesem Zweck mit besonderen Generatoren auszurüsten. Es sei viel besser, Umformer für die Erzeugung des Einphasenstroms im Kraftwerk vorzusehen. Wenn man die Kraftwerke mit Einphasengeneratoren ausrüsten wolle, müsse man auch dafür Platz vorhalten, und ein planmässiger Ausbau

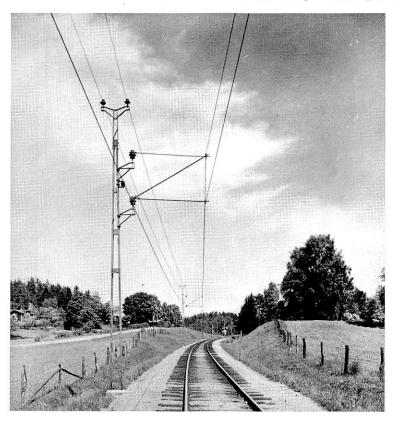


Bild 4. Fahrleitungsanlage für den elektrischen Zugbetrieb der Schwedischen Staatsbahnen. Über dem Gleis die Fahrleitung mit 16 000 Volt, auf den Masten die Rückleitung für den Bahnstrom und am Kopf der Maste eine Übertragungsleitung von 10 000 Volt, 50 Hz für Beleuchtung und Nebenzwecke.

der Kraftwerke sei deswegen unmöglich. Der Ausbau ganzer Kraftwerke wäre unter Umständen zufolge der Ungewissheit, ob man sie für Eisenbahnbetrieb oder nicht vorsehen solle, sogar verhindert.

Zur Klärung dieser Frage wurde im Jahre 1920 ein Ausschuss von Sachverständigen eingesetzt, der nach eingehenden Untersuchungen und Einholung von Gutachten ausländischer Sachverständigen im Jahre 1923 seinen Bericht erstattete. Demgemäss sollten die Bahnen in Süd- und Mittelschweden in der Regel durch Umformung von Drehstrom aus den Übertragungsnetzen für die allgemeine Kraftversorgung mit Strom versorgt werden. Die General-

direktion der Schwedischen Staatsbahnen schloss sich völlig dieser Meinung an und reichte sofort einen neuen Entwurf für die Ausführung der Elektrisierung Stockholm—Göteborg gemäss dem Umformersystem an die Regierung ein. Dieser Vorschlag wurde schon im Jahre 1923 von dem Schwedischen Reichstag genehmigt. Eines der grössten Probleme für die Eisenbahnelektrisierung hatte, wie es sich auch später gezeigt hat, dabei eine glückliche

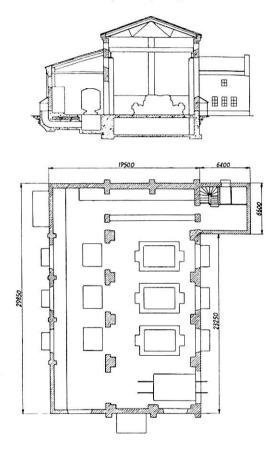


Bild 5. Plan und Querschnitt eines Umformerwerkes Bauart I.

Lösung gefunden. Das andere grosse Problem, die Störungsfrage, hatte, wie schon erwähnt, unmittelbar vorher eine voll befriedigende Lösung erhalten.

Das Umformersystem hat sich bei der weiteren Elektrisierung der Schwedischen Staatseisenbahnen gut bewährt. Viele bedeutende Vorteile haben sich dadurch ergeben, unter anderem der Vorteil, dass die Schwedischen Staatsbahnen gewöhnlicher Abnehmer von elektrischem Strom aus dem allgemeinen Kraftversorgungsnetz geworden sind und dadurch eine bessere Möglichkeit erhalten haben, ihre Energieentnahme in Übereinstimmung mit den Verkehrsverhältnissen zu vermehren oder zu vermindern. Die Einführung des Umformersystems wurde dadurch wesentlich erleichtert, dass erfahrungsgemäss,

wie oben erwähnt, jedes Umformerwerk eine abgetrennte Leitungsgruppe des Bahnnetzes speist. Infolgedessen werden auftretende Leitungsfehler, die glücklicherweise selten vorkommen, schnell gefunden, und die nötigen Untersuchungen können mit einfachen Mitteln, in gewissem Grade selbsttätig, aus-



Bild 6. Ansicht des Umformerwerkes Södertälje, Bauart I.



Bild 7. Inneres des Umformerwerkes Södertälje, Bauart I.

geführt werden. Das Umformersystem bietet auch den anderen grossen Vorteil, dass die Kurzschlusstromstärke im Fahrdrahtnetz begrentz wird, was niedrigere Unterhaltungskosten sowohl für das Leitungsnetz als auch für die elektrischen Lokomotiven und Triebwagen verursacht. Schliesslich hat

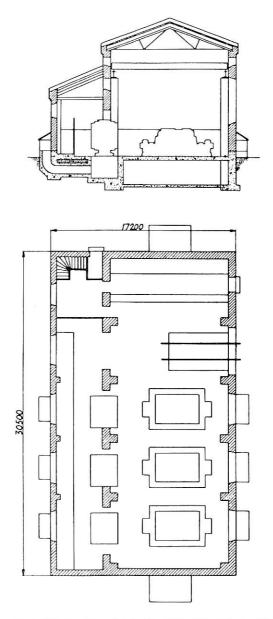


Bild 8. Plan und Querschnitt eines Umformerwerkes Bauart II.

das Umformersystem einen Vorteil gebracht, der von Anfang an nicht vorausgesehen war. Es hat die rasche Ausdehnung der Elektrisierung ermöglicht, die während der letzten Jahre verlangt worden ist (siehe Bild 2).

Zur Zeit (Sept. 1936) sind für die Elektrisierung der Schwedischen Staatsbahnen 17 Umformerwerke in Betrieb, und vor Ende des Jahres 1937 werden

noch vier solche Werke hinzukommen. Bild 3 zeigt das Schema der Energielieferung für die elektrischen Strecken südlich von Änge. Bild 4 zeigt die Fahrleitungsanlage mit der Rückleitung und der Übertragungsleitung.

Die Umformerwerke sind in vier verschiedenen Bauarten ausgeführt. Die Umformer in diesen Werken sind von vollständig gleicher Leistung und weisen nur den Unterschied auf, dass sie für die ersten zwei Bauarten der Umformerwerke ortsfest und für die weiteren aber fahrbar sind.

Die Einrichtung der bisherigen drei Bauarten von Umformerwerken und ihre Aussenansicht ist aus den Bildern 5 bis 15 zu ersehen. Die fünf Umformerwerke Södertälje, Sköldinge, Hallsberg, Moholm und Alingsås wurden gemäss der Bauart I (Bilder 5, 6 u. 7) in den Jahren 1924 bis 1926 für die

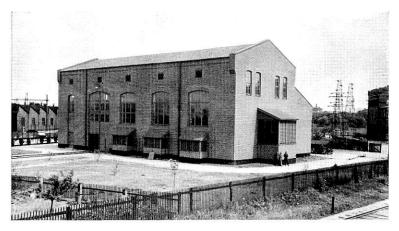


Bild 9. Ansicht des Umformerwerkes in Malmö, Bauart II. Das Innere ist dem der Bauart I beinahe gleich.

Strecke Stockholm—Göteborg errichtet. Die darauf folgenden sechs Umformerwerke Eksund, Mjölby, Nässjö, Alvesta, Hässleholm und Malmö wurden gemäss Bauart II (Bilder 8 u. 9) für die Elektrisierung der Malmö-Strecken in den Jahren 1931 bis 1933 gebaut. Von diesen elf Umformerwerken sind sechs mit je drei und fünf mit je zwei ortsfesten Umformern (Bild 10) ausgerüstet. Insgesamt sind also 28 ortsfeste Umformer vorhanden. Der Unterschied zwischen den Umformerwerken der Bauarten I und II besteht nur darin, dass bei der Ausführung neuerer Bauarten an Platz etwas gespart ist. Ausserdem sind einige Abänderungen der elektrischen Ausrüstung vorgenommen worden.

Von den weiteren Umformerwerken werden die meisten gemäss der Bauart III (Bilder 13, 14 u. 15) ausgeführt und mit fahrbaren Umformern (Bilder 11 u. 12) ausgerüstet. Sie sind wie gewöhnliche Lokomotivschuppen von der Parallelbauart ausgeführt und haben Platz für drei Umformer. Die Anzahl der in diesen Werken aufgestellten Umformer wird nach Bedarf verändert. Bis jetzt sind insgesamt 22 fahrbare Umformer für neun Umformerwerke dieser Bauart geliefert oder bestellt worden.

Auch in mehreren von den Umformerwerken der Bauarten I und II sind

Anordnungen getroffen, um die Aufstellung von fahrbaren Umformern für Reservedienst zu ermöglichen.

Der erforderliche Drehstrom wird durch Kabel dem Umformerwerke von nahegelegenen, dem Stormlieferer gehörigen Umspannwerken zugeführt, in denen die Drehstromspannung, die 50 000 oder 70 000, 130 000 und 220 000 Volt beträgt, auf die für die Umformer nötige Spannung abgespannt wird.

Aus diesem Drehstrom wird auch Einphasenenergie von 50 Hz entnommen, die im Umformerwerke durch besondere Umspanner auf eine Spannung

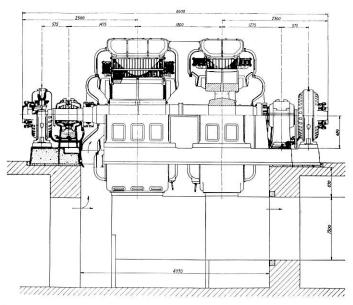


Bild 10. Querschnitt eines ortsfesten Umformers für Umformerwerke Bauart I und II.

von gewöhnlich 10 000 Volt gebracht und Stationen, Bahnwärterhäusern und anderen Plätzen längs der Bahn für Beleuchtung, Kraftbedarf und Signalanlagen zugeführt wird (siehe Bild 4).

Die Umformer werden mit Drehstrom 50 Hz und einer Spannung von rd. 6 300 Volt — in einem Falle 5 250 Volt — betrieben und liefern Einphasenstrom mit 16,7 Hz und einer Spannung von 3 000 Volt. Jeder Umformer besteht aus einem zwölfpoligen Motor von 3 200 kVA bei cos $\varphi=0,7$, einem vierpoligen Generator von 2 400 kVA bei cos $\varphi=0,8$ und zwei Erregermaschinen, eine für den Motor und eine für den Generator von je 33 kW bei höchstens 115 Volt. Der Motor und der Generator sind beide als Synchronmaschinen ausgeführt — also für eine Drehzahl von 500 U/min — mit einer den vier Maschinen gemeinsamen Welle, die nur von zwei Lagern getragen wird. Von den Statoren ist keiner drehbar ausgeführt; jeder Umformer kann auf der Einphasenseite bis auf 6 000 kVA überlastet werden.

Das Gewicht eines ortsfesten Umformers ausschliesslich der Grundplatte beträgt 66,4 t, wovon 26 t auf den rotierenden Teil entfallen. Der entsprechende fahrbare Umformer ist als ein fünfachsiger Wagen ausgerüstet mit einem Gesamtgewicht, einschliesslich des Gewichts aller Wagenteile, von

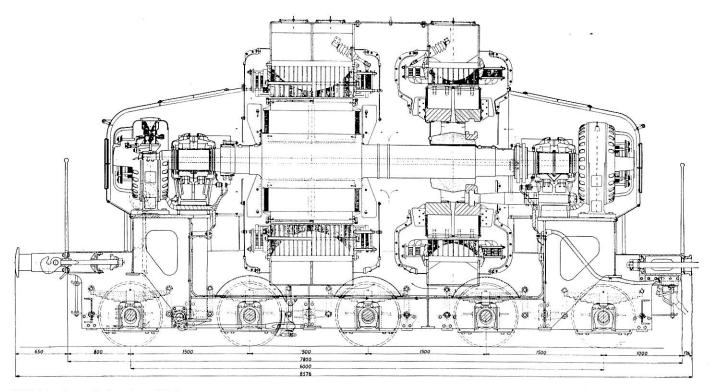


Bild 11. Querschnitt eines fahrbaren Umformers. Gesamtgewicht 85,9 t, Rotorgewicht 26 t, Drehzahl 500 U/min. Einphasenseitige Dauerleistung 2400 kVA. Der Umformer kann kurzzeitig bis 6000 kVA liefern. Der Umformer, der auf den Wagenfedern ruht, hat bei allen Belastungen einen sehr ruhigen Lauf, und Schwankungen sind, auch bei schwierigsten Kurzschlüssen, sehr gering — etwa 6 cm am höchsten Punkt des Umformers.

85,9 t. Der fahrbare Umformer ist, wie das Bild 11 erkennen lässt, nicht so ausgeführt, dass ein Umformer ungefähr normaler Bauart lediglich auf einem zweckmässigen Beförderungswagen untergebracht worden ist. Um Gewicht und Platz möglichst gering zu bekommen, ist es vielmehr notwendig gewesen, den Umformer in eine Art Wagen umzuändern, der mit Rädern, Puffern, Zugvorrichtung und anderen erforderlichen Wagenteilen versehen wurde.

Durch genaues Auswuchten der Rotoren hat der Umformer einen überaus ruhigen Lauf bekommen, und auch bei den schwierigsten Kurzschlüssen ist die Bewegung der Umformer sehr gering. Dies scheint vielleicht fast unglaublich mit Rücksicht darauf, dass das Gewicht des Rotors nicht weniger

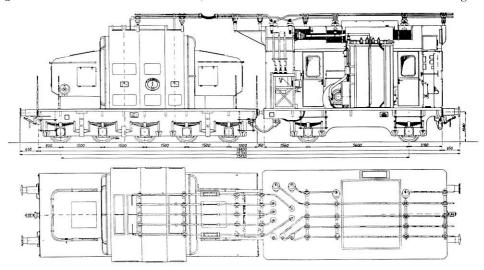


Bild 12. Fahrbarer Umformer mit Umspannwagen für Werke Bauart III und IV.

als 26 t beträgt und im Betrieb keine Versteifungen mittels Hebeschrauben verwendet werden. Solche Versteifungen waren von Anfang an als erforderlich berechnet, im Betrieb hat es sich aber herausgestellt, dass die Umformer ohne Nachteil auf den Wagenfedern ruhend betrieben werden können.

Der Generator jedes Umformers ist unmittelbar an einen Einphasenumspanner entsprechender Grösse angeschlossen, der zur Erhöhung der Spannung auf 16 000 Volt dient. Dieser Umspanner ist in Werken mit ortsfesten Umformern unmittelbar neben dem Umformer aufgestellt. Bei den fahrbaren Umformern ist er in einem besonderen, mit dem Umformerwagen kurzgekuppelten zweiachsigen Wagen — dem Umspannwagen — untergebracht (Bild 12). Dieser Wagen enthält auch die nötigen Apparate und Instrumente zum Anlassen und zur Regelung des Umformes.

Der Umformer wird derart angelassen, dass ungefähr ein Drittel der normalen Spannung unmittelbar auf den Motor geschaltet wird, wobei dieser wegen der Wirbelströme in Polen und Polschuhen als Induktionsmotor anläuft (siehe Bild 16). Infolge der ausgeprägten Pole geht der Motor zum Schluss in Synchronismus. Während des Anlassens entsteht in der Erregerwicklung des Motors, die an die Rotorwicklung der Erregermaschine direkt

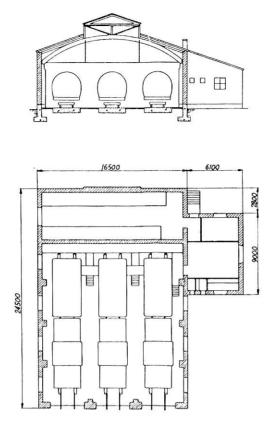


Bild 13. Plan und Querschnitt eines Umformerwerkes Bauart III.



Bild 14. Ansicht des Umformerwerkes Uppsala, Bauart III.

angeschlossen ist, ein Strom, der von einem Strommesser gezeigt wird, und der auf Null heruntergeht, wenn Synchronismus erreicht ist. Ein Anlassumspanner liefert die erforderliche Anlassspannung. Bei den fahrbaren Umformern befindet sich dieser Umspanner in demselben Kessel wie der Einphasenumspanner, der die Spannung auf 16 000 Volt erhöht.

Weil der Motor zwölfpolig und der Generator vierpolig ist, ist es nicht sicher, dass der Umformer, wenn er drehstromseitig den Synchronismus erreicht hat, auch einphasenseitig die richtige Phasenstellung aufweist. Der Motor kann bei Synchronismus sechs Stellungen einnehmen, von denen nur eine einphasenseitig richtig ist. Vor der Einschaltung auf die 16 000-Volt-Sammelschienen muss deswegen die Phasenlage auf der Einphasenseite des

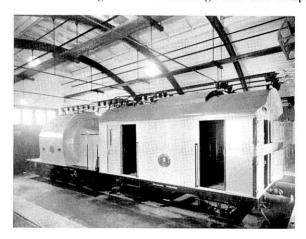
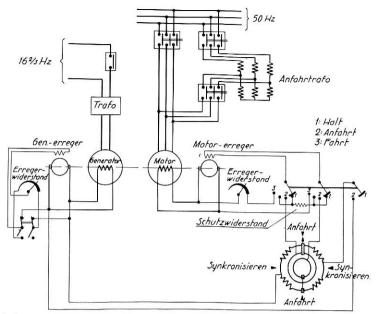


Bild 15. Inneres der Umformerschuppen Bauart III in Uppsala mit fahrbaren Umformern.

Umformers mittels eines Synchronoskops untersucht werden. Wenn es sich dabei herausstellt, dass die Einphasenstellung fehlerhaft ist, muss neuerdings eine Synchronisierung vorgenommen werden, und zwar in der Weise, dass die Stromrichtung in der Erregerwicklung des Motors umgekehrt wird. Bei jeder solchen Umkehrung fällt der Rotor eine Polteilung zurück. Im ungünstigsten Falle kann es nötig werden, fünf solche Umkehrungen zu machen, bevor die richtige einphasenseitige Phasenstellung erzielt wird.

Die Stromumkehrung für die Erregerwicklung des Motors erfolgt durch Umwechseln der Polarität des Motorerregers. Dieser Erreger wird daher während der Synchronisierungsperiode vom Generatorerreger erregt.

Für die Messung und Prüfung des ankommenden Drehstroms und des zum Bahnnetz abgehenden Einphasenstroms und für das Anlassen, die Regelung und Prüfung der Umformer ist in Werken mit ortsfesten Umformern längs einer Querwand eine Schalttafel vorhanden, auf der alle diesem Zweck dienenden Instrumente und Apparate angebracht sind. In Werken mit fahrbaren Umformern ist diese Schalttafel geteilt, so dass der für ankommenden und abgehenden Strom bestimmte Teil im Aufsichtszimmer aufgestellt ist, während der für das Anlassen, die Regelung und Prüfung des Umformers dienende Teil in dem Umspannwagen des Umformers untergebracht ist.



Anlassen:

- G und F werden in Anlasstellung geführt, B und D werden eingeschaltet. H wird, nachdem der Motor synchrone Geschwindigkeit erreicht hat, ein-
- geschaftet.

 G wird abwechselnd in die eine und die andere Stellung gelegt, bis die richtige einphasenseitige Phasenstellung erreicht wird.

 F wird in Fahrtstellung geführt, D und B werden ausgeschaltet, A wird eingeschaltet.

 E wird eingeschaltet.

Bild 16. Schaltungsschema von den Anlass- und Regelungsvorrichtungen eines Umformers.

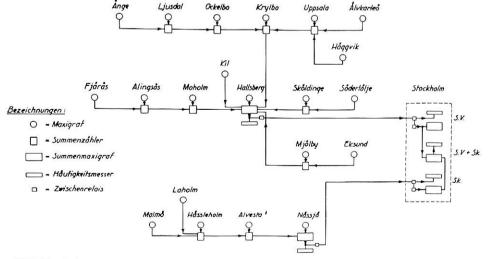


Bild 17. Schema der Messvorrichtungen für die elektrische Energie des Bahnbetriebes.

Für die Motor- sowie die Generatorseite der Umformer sind Schnellregler der Bauart Asea vorgesehen, mit denen die Spannung und drehstromseitig auch der Blindstrom geregelt werden kann. Bei den fahrbaren Umformern sind diese Regler in dem Umspannwagen untergebracht.

Die Umformer werden mit Hilfe eines Steuerumschalters und eines damit zusammengekuppelten Wechselschalters für den Erregerstrom des Motors angelassen und synchronisiert. Beide sind an dem Motorfeld der Schalttafel angebracht. Der Umschalter hat drei Stellungen, und zwar Halt, Anlassen und Betrieb. Das Anlassen geschieht mittels elektromagnetisch betätigter Ölschalter, die den Steuerstrom von dem oben angegebenen Umschalter erhalten. Die Ölschalter sind gegenseitig so verriegelt, dass die Steuerung halbautomatisch erfolgt, ohne dass Fehlerschaltungen entstehen können. Die Anlasszeit eines Umformers beträgt rd. 3 Minuten, die Ausschaltung kann unmittelbar geschehen.

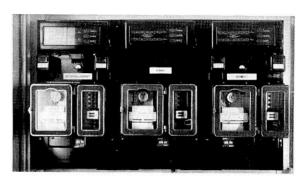


Bild 18. Messgeräte in Stockholm für die Kontrolle des Energieverbrauchs.

Die Ölschalter für dieses Anlassen sind in den ortsfesten Werken entlang einer Längswand in einem Seitenschiffe des Maschinensaals angebracht. Am Ende des Maschinensaals, wo die Schalttafel aufgestellt ist, befinden sich in demselben Seitenschiff die für den ankommenden Drehstrom erforderlichen Ölschalter und Messvorrichtungen sowie die Einrichtungen für die Lieferung des Stromes von 50 Hz, für Beleuchtung und sonstige Zwecke der Bahn entlang. In Werken Bauart III sind die entsprechenden Vorrichtungen in einem geeigneten Raum in Umformerschuppen aufgestellt.

Hinter der Schalttafel längs der einen Querwand des Maschinensaals sind die Ölschalter für den an das Bahnnetz abgehenden Einphasenstrom aufgestellt. Die Zahl dieser Schalter wechselt nach Bedarf in den verschiedenen Werken von 2 bis 6.

Diese Ölschalter sind alle sogenannte »kluge» Schalter und bei allen Werken ausser den fünf ersten auch Schnellschalter, die, wenn Kurzschlüsse auftreten, den Strom in ½33 sec ausschalten. Sie sind ferner so angeordnet, dass sie, wenn Fehler in der Fahrleitung auftreten, zuerst selbsttätig den Strom abschalten und dann das erforderliche Fehlersuchen selbst vornehmen. Sie machen dabei nach 5 sec einen ersten Versuch, über einen Widerstand wieder einzuschalten. Wenn dies nicht gelingt, werden noch zwei Einschaltungen versucht, eine nach 30 sec und eine 3 min später. Nur wenn die Wieder-

einschaltung bei einem dieser Versuche wegen fortbestehendes Fehlers nicht erfolgen sollte, wird das Personal durch Alarmsignal herbeigerufen, um erforderliche Massnahmen für das weitere Fehlersuchen und die Ausschaltung des gestörten Fahrleitungsteils zu treffen.

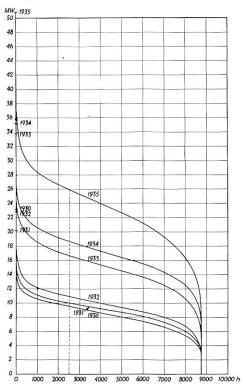


Bild 19. Häufigkeitskurven der Energielieferung für den Bahnbetrieb südlich von Ånge und nördlich von Nässjö und Laholm in den Jahren 1930—1935.

Jahr	Energieverbrauch	Höchster Viertel- stundemittelwert
	kWh	kW
1930	73 074 590	23 100
1931	78 277 000	20 100
1932	84 728 000	22 800
1933	130 899 000	33 800
1934	148 076 500	35 200
1935	203 427 000	50 800

Die Umformerwerke der Bauart I und II haben, wie aus den Bildern 5 und 8 hervorgeht, nur ein Erdgeschoss für die Umformer und Schaltanlage. Darunter gibt es noch ein Kellergeschoss, durch das die Kühlluft für die Umformer und Transformatoren durchgeführt wird. In diesem Kellergeschoss befinden sich auch einige Apparate, die von der oben im Maschinensaal befindlichen Schaltafel aus betätigt werden. Diese Umformerwerke sind mit einem elektrisch betätigten Kran von 30 t für das Heben der Umformer bei

Montage und Ausbesserungen ausgerüstet. In den meisten Werken ist auch ein Senktisch für 80 t angeordnet, auf dem die Umspanner der in der Nähe liegenden Umspannwerke gesenkt und instandgesetzt werden können.

Die Werke Bauart III sind weder mit einem Kran noch einem Senktisch ausgerüstet, auch ein Kellergeschoss ist nicht erforderlich. Wenn an den Unformern dieser Werke Fehler auftreten, werden die Umformer an eine zunächstliegende geeignete Werkstatt zur Ausbesserung gesandt. Dieser werden auch die fahrbar ausgeführten Umspanner der nebenliegenden Umspannwerke zugeführt.

Tafel I. Zusammenstellung des Energieverbrauchs und der Energiekosten für den Bahnbetrieb südlich von Ånge.

		Jahr		
		1935	1938	
Gesamtverbrauch an Energie, 50 Hz	kWh 2	289 303 000	410 000 000	
Ausgenutzte Energie, 50 Hz	»	$12\ 078\ 000$	$15\ 000\ 000$	
Ausgenutzte Energie, 16 ² / ₃ Hz	»	230 451 000	330 000 000	
Ausgenutzte Gesamtenergie	» 5	$242\ 529\ 000$	345 000 000	
Umformerverluste	>>	$46\ 774\ 000$	65 000 000	
Jahreswirkungsgrad der Umformer in %		83,2	83,5	
Gesamtkosten der elektrischen Energie	Kronen	$6\ 425\ 741$	8 368 000	
Die Kosten der Nutzenergie im Mittel je kWh¹)	Öre	2,65	2,43	
Die Kosten der Gesamtenergie im Mittel je kWh¹)	»	$2,\!22$	2,04	

¹⁾ Nutzenergie = Gesamtenergie minus Umformerverluste.

Eine vierte Bauart von Umformerwerken ist jetzt im Bau. Die unterscheidet sich von Bauart III darin, dass auch die noch übrigen ortsfesten Einrichtungen in einem Wagen untergebracht worden sind. Bauart IV wird also ganz fahrbar, diese soll auch bei anderen Umformerwerken Reservedienst leisten können wenn eine von ihnen für Ausbesserung oder Abänderung ausser Betrieb gesetzt werden muss.

Die Drehstromenergie für die Umformerwerke wird mit einer Spannung von 6 300 Volt (in einem Falle 5 250 Volt) an die Umformerwerke geliefert und bei dieser Spannung gemessen. Um einen geeigneten Strompreis zu ermöglichen, wird die elektrische Energie nach einem ziemlich verwickelten Stromtarif bezahlt, und zwar

- 1. eine feste Jahresübertragungsgebühr, und dazu
- 2. eine Grundkraftgebühr von 97,50 Kronen je Kilowatt und Jahr, und
- 3. eine Spitzenkraftgebühr von 35 Kronen je Kilowatt und Jahr, und dazu 2,5 Öre je Kilowattstunde.

Der Umfang der Energielieferung und deren Kosten is aus Tafel I zu ersehen, die teils die Zahlen des Jahres 1935, teils berechnete Zahlen für das Jahr 1938 zeigt, also für des erste Jahr, nach dem die jetzt beschlossene Elektrisierung ganz durchgeführt ist.

Die Verteilung der Energielieferung zwischen den einzelnen Umformerwerken ist aus der Tafel II ersichtlich.

Tafel II. Der Energieumsatz in den Umformerwerken der schwedischen Staatsbahnelektrisierung im Jahre 1935.

Umformerwerk	Ausgenutzte Energie 16²/ ₃ Hz	Ausgenutzte Energie 50 Hz	Umformer- verluste	Gesamt- verbrauch an 50 Hz Energie	Höchst- belastung an 50 Hz	Belas- tungszeit
	kWh	kWh	kWh	kWh	kW	Stunden
Ockelbo	696 000	29 450	210 550	936 000	5 100	_
Krylbo	9 177 000	505 203	2 293 797	11 976 000	5 700	2 100
Uppsala	16 118 000	452 040	$3\ 469\ 960$	20 040 000	8 000	2 505
Södertälje	40 828 300	629 450	$7\ 624\ 250$	49 082 000	15 100	3 250
Sköldinge	9 459 900	333 950	$2\ 022\ 150$	11 816 000	5 300	2 225
Hallsberg	23 133 700	3 926 743	4 811 557	31 872 000	9 600	3 320
Moholm	14 400 800	481 335	$2\ 401\ 865$	17 284 000	6 900	2 505
Alingsås	19 176 900	$452\ 530$	4485570	24 115 000	8 700	2 770
Eksund	15 198 700	543 797	3 252 503	18 995 000	6 500	2 920
Mjölby	14 587 500	651 040	3 008 460	18 247 000	5 900	3 090
Nässjö	18 936 200	823 110	3 533 690	23 293 000	8 900	2 620
Alvesta	9 953 800	285 210	1 668 990	11 908 000	5 500	2 165
Hässleholm	10 505 400	370 850	1 837 750	12 714 000	6 200	2 050
Malmö	24 440 500	2 404 120	5 190 380	32 035 000	10 600	3 020
Laholm	3 838 300	189 172	962 528	4 990 000	4 300	_
Zusammen	230 451 000	12 078 000	46 774 000	289 303 000	62 400	4 540

Die angegebenen Höchstbelastungen sind Viertelstundemittelwerte. Die Gesamthöchstbelastung ist ohne Zuschlag für die Umformerwerke in Ockelbo und Laholm angegeben, die nur während eines Teiles des Jahres in Betrieb gewesen sind. Betrieb hat in Ockelbo am 26. November und in Laholm am 1. Juli 1935 angefangen.

Der verwendete Stromtarif bedingt eine Zusammenrechnung der Belastung aller Umformerwerke. Dies geschieht mit Hilfe eines Drahtpaares in den längs der elektrisierten Strecken verlegten Fernmeldekabeln, und mit Hilfe von Summierungsapparaten, Maxigraphen und Häufigkeitsmessern, Bilder 17 und 18. Der Häufigkeitsmesser gibt ausser einer Häufigkeitskurve für die Last auch Angaben über den Viertelstundemittelwert der Höchstbelastung, den Gesamtverbrauch an Kilowattstunden und die Kilowattstundenzahl für die Spitzenkraft. Die Grösse der Grundbelastung wird von den Staatseisenbahnen durch Berechnung festgestellt und vor Anfang jedes Lieferjahres dem Stromlieferer angegeben.

Die Häufigkeitskurve der Jahre 1930—1935 für die Lieferungen der Schwedischen Wasserkraftdirektion — für die Lieferung an alle Umformerwerke nördlich von Nässjö und Laholm — geht aus dem Bild 19 hervor. Zur Erläuterung desselben wird in Bild 2 die Entwicklung der Elektrisierung während der Jahre 1915 bis 1937 gezeigt. Hieraus ist auch zu ersehen, dass die Elektrisierungsarbeit in Schweden nach dem Jahre 1932 mit rekordmäs-

siger Geschwindigkeit fortgeschritten ist — nicht weniger als rund 50 km Gleis je Monat sind in dieser Zeit elektrisiert worden.

Die Umformung des Drehstroms von 50 Hz in den für das Bahnnetz erforderlichen Einphasenstrom von niedriger Frequenz kann auch mittels der Umrichter vorgenommen werden. Von den in Betracht kommenden Firmen hat jedoch keine bis jetzt solche Umrichter liefern können. Die Schwedischen Staatsbahnen konnten daher die weitere Entwicklung der Umrichter nicht mehr abwarten, da die Elektrisierungsarbeiten in rascher Folge ausgeführt werden mussten.

Im Jahre 1938 werden rechnungsmässig zwar die Verluste in den Umformern der Staatseisenbahnen nicht weniger als 65 000 000 kWh (siehe Tafel I) betragen. Von Anfang an wurde versprochen, dass der Wirkungsgrad der Umrichter 95 % betrage. Später wurde diese Zahl auf 90 % abgemindert. Die Umrichter sollten daher einen um 6.5 % besseren Wirkungsgrad als die Umformer ergeben und dadurch 25 000 000 kWh, entsprechend rd. 375 000 Kr. im Jahre 1938 ersparen, vorausgesetzt, dass nur im Umrichterbetrieb gearbeitet wurde. Diese Ersparnis bedeutet aber in diesem grossen Problem wenig im Verhältnis zu anderen Umständen. Der jetzige Umformer bildet eine Art Ventil, und zwar ein sehr sicheres. Kurzschlüsse im Einphasennetz sind ohne Einfluss auf die Drehstromübertragung, und der Kurzschlussstrom ist einphasenseitig auf weniger als 4 000 A beschränkt. Zum Vergleich kann erwähnt werden, dass bei anderen elektrisierten Einphasenbahnen Kurzschlussströme bis 40 000 A und darüber vorkommen. Bei den Schwedischen Staatsbahnen sind deswegen die Kosten der Unterhaltung gering und der Betrieb ist störungsfrei.