

Simultanbetrieb von Dreiphasen- und Einphasen-Anlagen durch Stromüberlagerung (Doppelfrequenzbetrieb) auf gemeinschaftlichen Linien

Autor(en): **Jacob, Ernst**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **93/94 (1929)**

Heft 20

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-43460>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Rechnen wir zu allen diesen Beleuchtungsanlagen die gesamte Beleuchtung der Ausstellung und das strahlende Diadem, das 8 grosse Scheinwerfer hinter dem Nationalpalast bilden, so versteht man, dass die Schau auf weite Entfernung — etwa 100 km — sichtbar ist, und der Leser mag sich einen ungefähren Begriff machen von dem Riesenaufwand an Elektrizität, womit die neue Stadt des Lichtes ihre Besucher von Nah und Fern empfängt.

Alfredo Bäschlin.

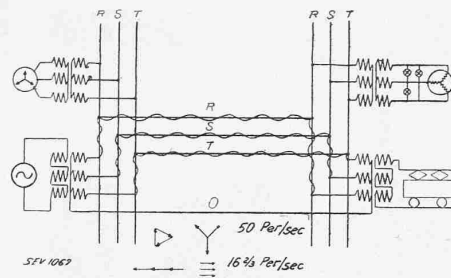


Abb. 3. Prinzip der Vierleiter-Schaltung.

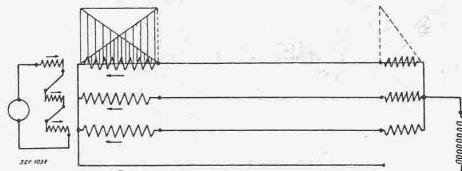


Abb. 4. Teilspannungen bei Doppelfrequenzbetrieb.

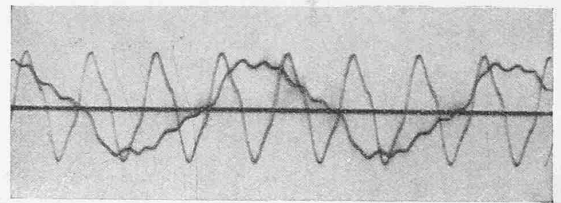


Abb. 1. Einphasen- und Dreiphasenschwingung.

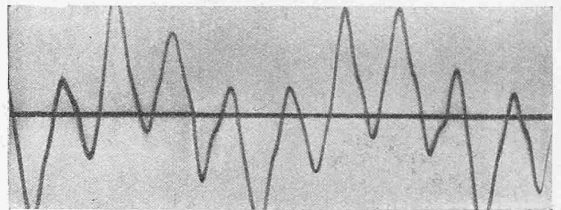


Abb. 2. Resultierende Schwingung der Komponenten der Abb. 1. (Abb. 1 und 2 Bildstöcke des Verfassers.)

Simultanbetrieb von Dreiphasen- u. Einphasen-Anlagen durch Stromüberlagerung (Doppelfrequenzbetrieb) auf gemeinschaftlichen Linien.

Von Baurat Dr. Ing. ERNST JACOB, Stuttgart.¹⁾

In allen Ländern, die für das Bahnstromsystem den Einphasen-Wechselstrom von $16\frac{2}{3}$ Per/sec gewählt haben, wird es immer als ein fühlbarer Nachteil empfunden, dass die von der normalen Periodenzahl 50 abweichende Bahnfrequenz die Erstellung gemeinsamer Kraftwerke, Leitungen und Unterwerke für Landes- und Bahnversorgung zusammen zunächst unmöglich macht. Es wurden vielmehr in der Schweiz, in Deutschland und auch in den nordischen Ländern völlig getrennte Stromversorgungsnetze für Bahn- und Allgemeinbedarf entwickelt, die entsprechend hohe Sonderkosten insbesondere für die Bahnnetze mit sich bringen. Bestrebungen, die Bahnversorgung in geeigneter Weise in die allgemeine Landesversorgung einzugliedern mit dem Zweck der Ersparnis eines besonderen Bahn-Primärnetzes sind daher schon frühzeitig aufgetreten, und zwar versuchte man zunächst das Problem durch rotierende Perioden-Umformer zu lösen. Die praktische Durchführung dieses Gedankens im grossen ist aber unterblieben, weil die Lösung einen sehr hohen Kostenaufwand für die rotierenden Umformer und vor allem viel zu hohe Jahresverluste für die Energieumformung mit sich bringt. Um diese Nachteile zu vermeiden, habe ich versucht, an die Stelle der Frequenzumformung die *Frequenzüberlagerung* treten zu lassen und habe auf diesem Gedanken folgendes Uebertragungssystem aufgebaut:

Der Drehstromschwingung von 50 Per/sec, die auf unseren normalen Drehstromleitungen besteht, wird die Bahnstromschwingung von $16\frac{2}{3}$ Per/sec elektrisch „unterlagert“. Es ergeben sich dabei auf der Leitung selbst resultierende Schwingungszustände, wie sie durch die Abb. 1 und 2 in ihrem praktischen Verlauf anhand von Oszillogrammen zu sehen sind. Das wesentliche Kennzeichen des Ueberlagerungsvorganges ist dabei: die Scheitelwerte addieren sich arithmetisch ($E_{res} = E_I + E_{III}$), die Effektivwerte dagegen nach Pythagoras ($I_{res} = \sqrt{I_I^2 + I_{III}^2}$). In Bezug auf Spannungs- und Leistungsverluste sind beide Stromsysteme voneinander völlig unabhängig.

Technisch wird die Ueberlagerung der beiden Schwingungen auf folgendem Weg erreicht: Man denke sich in Abb. 3 die Drehstromsammelschiene des Unterwerkes links über eine normale Drehstromleitung mit der Drehstrom-

sammelschiene des Unterwerkes rechts verbunden. Die Uebertragung des Drehstroms geht in bekannter Weise von dem Generator links über die Leitung zum sekundären Netz rechts vor sich. An das gleiche Drehstromsystem wird nun links und rechts an der Sammelschiene je eine als Nullpunkt wirkende dreiphasige Wicklung angeschlossen, die auf einen Eisenkern mit magnetischem Rückschluss aufgebracht ist. Die Sekundärwicklung auf diesem Eisenkern besteht ebenfalls aus drei Wicklungen, die aber hintereinander, also in Reihe geschaltet sind. Die Nullpunkte der Hochvoltwicklung sind durch einen vierten Leiter, der für die volle Betriebsspannung isoliert wird, über das Leitungsgestänge miteinander verbunden. Diese Anordnung wirkt nun folgendermassen: Für den Drehstrom bildet die Dreiphasenwicklung einen künstlichen Nullpunkt, sodass im normalen Betrieb der vierte Leiter O frei von Drehstromspannung bleibt. Die drei Komponenten des Dreiphasenflusses im Eisenkern des Transformators sind gegenseitig um 120° verschoben; die drei sekundär erzeugten 50periodigen Teilspannungen bilden daher ein in sich geschlossenes gleichseitiges Dreieck, d. h. sie heben sich durch die Reihenschaltung der Niederoltwicklungen auf. Der vom Einphasen-Generator links erzeugte Einphasenstrom magnetisiert dagegen jede der drei Transformatorwicklungen gleichphasig und transformiert daher seine Einphasen-EMK gleichsinnig auf alle Schenkel der Hochvoltseite; unter der Einwirkung dieser Einphasen-EMK kommt hochvoltseitig eine über- oder besser unterlagerte Einphasenschwingung zustande, die den vierten Leiter O als Hinweg und die Drehstromleitung RST als Rückweg benutzt. Auf die Sekundärseite der normalen Drehstromtransformatoren kann die unterlagerte Einphasenspannung nicht gelangen, da alle drei Phasenleiter unter sich gleiches Potential haben und der Nullpunkt entweder isoliert oder über eine Petersen-Spule an Erde gelegt ist.

Das Charakteristische dieser Schaltung, wegen des hierzu nötigen vierten Leiters Vierleiterschaltung genannt, ist nun die Spannungsverteilung, die sich bei dieser Anordnung einstellt. Setzen wir zunächst voraus, wir hätten ein Netz mit völlig isoliertem Nullpunkt, also ohne Erdschluss-Spulen, dann verteilen sich die Spannungen auf den vier Leitern nach dem Verhältnis der Teilkapazitäten dieser Leiter. Die drei Drehstromphasen werden also zunächst einmal ihre gleichhohe Phasenspannung gegen Erde haben (z. B. 64 kV beim 110 kV-System) und der vierte Leiter wird keinerlei 50periodige Spannung führen, weil der Nullpunkt symmetrisch zum Drehstromsystem liegt. Die Einphasenspannung dagegen wird sich entsprechend dem Verhältnis der Teilkapazitäten der drei Drehstromleiter einerseits zum vierten Leiter, andererseits zu $\frac{3}{4}$ auf den

¹⁾ Gekürzte Wiedergabe eines an der Generalversammlung des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke in St. Moritz am 6. Juli 1929 gehaltenen und im „Bulletin des S. E. V.“ vom 5. Oktober 1929 veröffentlichten Vortrags.

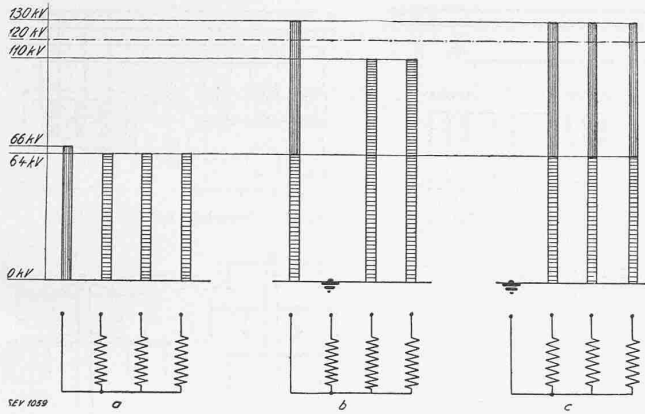


Abb. 5. Potentialverteilung bei Doppelfrequenzbetrieb.

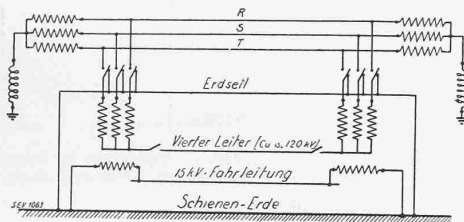


Abb. 6. Prinzipschema der Mitübertragung von Bahnstrom beliebiger Spannung über Drehstromleitungen ohne dessen Transformation an beiden Leitungsenden.

vierten Leiter legen und nur zu $\frac{1}{4}$ auf die Drehstromleiter, d. h. also: bei einer Bahnspannung von 60 kV überlagern sich im Drehstromsystem nur 15 kV, im vierten Leiter dagegen 45 kV. Das ist schon recht günstig, weil die Isolationsbeanspruchung des Drehstromsystems durch die zusätzliche Bahnspannung dadurch in sehr geringen Grenzen bleibt. Hat das Drehstromsystem nun Erdschluss-Spulen, so wird die Spannungsverteilung noch günstiger, denn durch die Erdung des Drehstrom-Nullpunkts über die für $16\frac{2}{3}$ Per/sec eine nur sehr geringe Reaktanz bildende Spule wird die Einphasenspannung völlig auf den vierten Leiter hinübergeschoben, während die drei Drehstromleiter von zusätzlicher Einphasenspannung praktisch so gut wie frei bleiben. Diese Spannungsverteilung ist in den Abb. 4 bis 6 graphisch aufgetragen. In Abb. 4 sieht man, wie vom Nullpunkt aus die 50periodige Drehstromspannung bis zu den Wicklungsenden des Transformators ansteigt, in Höhe der Phasenspannung auf der Leitung liegen bleibt und in der Wicklung des Bahntransformators bis zu dessen Nullpunkt wieder den Wert 0 annimmt. Umgekehrt ist es mit der $16\frac{2}{3}$ -periodigen Einphasenspannung. Diese ist durch die Erdschluss-Spule innerhalb der Drehstromleitung auf dem Wert 0 festgehalten und steigt dann in der Wicklung des Bahntransformators bis auf den vollen Wert der verketteten Betriebsspannung (z. B. 60 kV) an, die dann auf dem vierten Leiter liegen bleibt. Wählt man also beispielsweise die verkettete Bahnspannung gleich der Drehstrom-Phasenspannung, so haben im normalen Betrieb alle vier Leiter genau gleiches Potential gegenüber Erde. Man ersieht dies auch sehr deutlich aus Abb. 5a, in der die Potentialverteilung bei 110 kV Drehstrom- und 66 kV Bahnstromspannung eingetragen ist.

Die gleiche Abb. veranschaulicht auch die Verhältnisse bei Erdschluss auf den einzelnen Leitern. Durch diesen wird die bei normalem Betrieb bestehende Symmetrie der Spannungsverteilung empfindlich gestört. Das ist schon bei der gewöhnlichen Drehstromübertragung so, und naturgemäss erst recht bei Doppelfrequenzbetrieb. Wir unterscheiden zwei Fälle: Erdschluss auf einem Leiter des Drehstromsystems und Erdschluss des vierten Leiters. Im ersten Falle schwingt die Spannung der beiden gesunden Drehstromphasen wie üblich auf den verketteten Wert, die Spannung der erdgeschlossenen Phase geht auf Null herunter. Dagegen erhält jetzt der Nullpunkt der Dreiphasenwicklungen und

damit auch der vierte Leiter eine 50periodige Vorspannung in Höhe der Drehstrom-Phasenspannung und darauf setzt sich die vorher schon bestehende Einphasen-Betriebsspannung, sodass die aus Abb. 5b ersichtlichen Spannungswerte resultierend zustande kommen. Im zweiten Fall geht die Spannung des erdgeschlossenen vierten Leiters auf Null herunter, die drei Drehstromleiter werden dadurch auf ihrer Drehstrom-Phasenspannung festgehalten, und hierauf setzt sich gleichphasig in allen drei Leitern die Einphasen-Betriebsspannung; Endwert siehe Abb. 5c. In beiden Fällen überschreiten die höchsten auftretenden Spannungsbeanspruchungen nur um weniges die betriebsmässigen, sodass in Anbetracht des Sicherheitsgrades der Isolation unserer Leitungen auch bei Erdschluss die resultierende Spannungsbeanspruchung ausgehalten werden kann. Für schweizerische Verhältnisse mit 60 bis 66 kV Bahnspannung und 110 bis 120 kV Drehstromspannung kann die Isolation der Drehstromseite jedenfalls unverändert bleiben, während die Isolation der an die Simultanstrecke angeschlossenen Bahnunterwerke auf 120 kV bemessen werden muss.

Für deutsche Verhältnisse liegt die Sache etwas schwieriger, soweit die Bahnspannung von 110 kV beibehalten werden soll. Hierfür habe ich in jüngster Zeit folgende Variante entwickelt: In Abb. 6 ist eine Drehstromübertragung zwischen zwei mit Petersen-Spule versehenen Unterwerken dargestellt. Gleichzeitig wird auf der Drehstromleitung und über den hinzugefügten vierten Leiter Bahnstrom in der bisher geschilderten Weise übertragen. Die neuartige Ergänzung besteht darin, dass die drei Kesselölschalter der Bahntransformatoren beim Abschalten die drei freien Wicklungsenden der Bahntransformatoren an Erde, d. h. an das Erdseil der Leitung und möglichst zugleich auch an die Schienenerde des ganzen Bahnnetzes legen. Im normalen Betrieb sind die Bahntransformatoren also über die drei starken Kupferleiter der Drehstromleitung rückgeschlossen. Sobald jedoch im Drehstromnetz ein Erdschluss auftritt, spricht ein Erdschlussrelais an und wirkt augenblicklich auf die drei Kesselölschalter der Bahntransformatoren dahin ein, dass diese jeden Bahntransformator vom Drehstromnetz trennen und einseitig an Erde legen. Solange die Drehstromphase an Erde liegt, wird automatisch auch das Bahnstromsystem einpolig an Erde gelegt, aber in einer Weise, die für diese Zeit eine Ueberlagerung des vierten Leiters mit der Drehstrom-Phasenspannung ausschliesst, indem für die Dauer der Störung eine Abtrennung der beiden Netze voneinander stattfindet. Nach Beseitigung des Erdschlusses werden die Bahnstrom-Transformatoren wieder über die Drehstromleitung rückgeschlossen und die Erdseilverbindung aufgehoben. Erfolgt umgekehrt auf dem vierten Leiter ein Erdschluss, so wirken auch hier die dafür vorgesehenen Erdschlussrelais (abhängig von der $16\frac{2}{3}$ periodigen Spannung auf der Drehstromseite) auf die drei Kesselölschalter der Bahntransformatoren ein und legen die Bahntransformatoren auch auf der andern Seite an Erde unter Abtrennung vom Drehstromnetz. Hierdurch wird auf der erdschlussbehafteten Teilstrecke der Erdschluss zum Kurzschluss, und die betreffende Teilstrecke wird durch den normalen Ueberstromschutz selektiv abgeschaltet; auf den gesunden Leitungsteilen geht der Bahnstrombetrieb zunächst unter Rückschluss auf das Erdseil, dann wieder unter Rückschluss über die Drehstromleitung ungestört weiter.

Diese Anordnung gestattet vor allem die unmittelbare Mitübertragung von Bahnstrom beliebiger Spannung über Drehstromleitungen ohne Transformation des Bahnstroms am Anfang und Ende der mitbenutzten Leitung. Während des normalen Betriebes bieten sich dem Bahnstrom die grossen Kupferquerschnitte der Drehstromleitung, sodass wesentlich niedrigere Uebertragungsverluste entstehen; ferner werden bei Störungen durch Erdschluss die unangenehmen Spannungserhöhungen einzelner Leiter auf die normalen verketteten Betriebsspannungen der einzelnen Systeme beschränkt, sodass keinerlei Ueberbeanspruchung der Isolation stattfindet, bzw. keine höhere als die normale Isolation der Einzelsysteme nötig ist.

Die Abb. 7 bis 9 zeigen die einzelnen Bauelemente bei Doppelfrequenzbetrieb. Das Rückgrat des Unterwerks (Abb. 9) ist die Vierleiter-Doppelsammelschiene. Von dieser laufen nach der einen Seite die Leitungsverbindungen, und zwar vier Seile als Einschleifung zu den Bahnstromleitern und zwei mal drei Seile als Rückführung des Bahnstroms zu den beiden Drehstrom-Systemen. Die Abtrennung der Leitungsverbindungen erfolgt in üblicher Weise über drei bzw. einen Kessel-Oelschalter. Nach der andern Seite sind an die Doppelsammelschiene die Bahntransformatoren angeschlossen, jeder über einen einpoligen Oelschalter für den vierten Leiter und einen dreipoligen Oelschalter für die Rückführung zu den Drehstromleitern. Die 15 kV-Seite ist gegenüber der bisherigen Ausführung völlig unverändert.

Ein solches Unterwerk für Doppelfrequenz-Betrieb mit 15000 kVA Transformatorleistung und 70/15 kV Betriebsspannung, jedoch isoliert für 135 kV hochvoltseitig, wurde von der Reichsbahn-Direktion Stuttgart im Detail durchprojektiert. Dabei zeigte sich, dass eine sehr übersichtliche und klare Gliederung von Sammelschiene, Transformatoren und Oelschaltern möglich ist, die hinter der eines gewöhnlichen Einphasen-Unterwerks nicht zurücksteht. Der Platzbedarf wird allerdings etwas grösser, nämlich 18000 m² gegenüber 16800 m² in gewöhnlicher Einphasen-Ausführung. Die Kosten für den Hochvoltteil des Unterwerks betragen infolge der höheren Isolation der ganzen elektrischen Ausrüstung 1,40 Mill. M. gegenüber 1,05 Mill. M. bei gewöhnlicher Einphasenausführung bei 110 kV. Der Hochvoltteil des Unterwerks wird also um rund 33% teurer.

Der Umbau einer bestehenden 110 kV-Leitung von sechs Leitern auf acht Leiter unter gleichzeitiger Verstärkung der Leitung gegen Torsion kostet pro km durchschnittlich etwa 12000 M. bzw., wenn die Leitung schon verdrehungssicher ist, etwa 9000 M. Jedes Bahnunterwerk in Vierleiterschaltung kostet rund 350000 M. mehr als in normaler Zweileiteranordnung. Ausserdem müssen an der Anschaltstelle der Bahnunterwerke gewisse zusätzliche Leitungsbauten ausgeführt werden, je nach der geographischen Lage des Bahnunterwerks zur Drehstromleitung, die pro Unterwerk im Mittel mit rund 60000 M. einzusetzen sind. Dafür kommt die besondere Einphasen-Doppelleitung mit rund 25000 M. Baukosten pro km in Wegfall.

Der grundsätzliche Abgleich ergibt also für eine Netzlänge von beispielsweise 300 km mit vier Bahnunterwerken und einem Bahnkraftwerk:

Mehrkosten: Zwei weitere Leiter auf 300 km	300 · 12000 = 3,60 · 10 ⁶ M.
Mehrkosten von 4 Unterwerken	4 · 350000 = 1,40 · 10 ⁶ M.
Mehrkosten für den Hochvoltteil des Kraftwerks	1 · 400000 = 0,40 · 10 ⁶ M.
Mehrkosten für vier zusätzliche Einschleifungen	4 · 60000 = 0,24 · 10 ⁶ M.
	5,64 · 10 ⁶ M.

Minderkosten: Wegfall von 300 km Doppelleitung zu 25000 M. = 7,50 · 10⁶ M.

Ersparnis für 300 km Netzlänge 1,86 · 10⁶ M.

d. h. pro 100 km Netzlänge eine Ersparnis von 620000 M. = rund 25% der Baukosten einer getrennten Einphasenleitung. Diese grundsätzlichen Ergebnisse gelten dann, wenn der Bahnstrom am Anfang und Ende der Doppelfrequenz-Betriebstrecke entweder von einem in Vierleiterschaltung arbeitenden Bahnkraftwerk oder von einem getrennten Bahnnetz her ohne nochmalige Transformation eingeführt wird. Wird aus betrieblichen Gründen eine Aenderung der Spannung und daher eine Transformierung des Bahnstroms

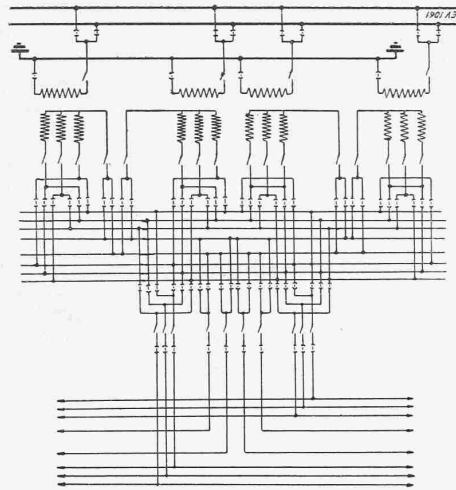


Abb. 9. Generelles Schema eines Bahnunterwerkes für 70 kV Uebertragungsspannung.

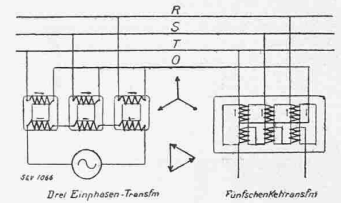


Abb. 8. Transformator-Schaltungen.

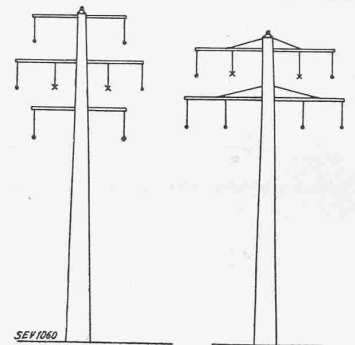


Abb. 7. Mast-Typen bei Doppelfrequenz-Betrieb mit Vierleiterschaltung.

am Anfang oder Ende der Doppelfrequenz - Strecke nötig, so bringt dies erhebliche zusätzliche Kosten mit sich, die keine grosse Ersparnis mehr übrig lassen.

Seine vollen wirtschaftlichen Vorteile entfaltet also der Doppelfrequenzbetrieb dort, wo Uebertragungen über grössere Streckenlängen mit einheitlicher Bahnbetriebsspannung vom Kraftwerk aus in Frage kommen; für kürzere Streckenlängen ist er wirtschaftlich nur dann günstig, wenn unter Benutzung der Abtrennung vom Drehstromnetz bei Erdschluss das Bahnstromsystem sich einpolig erden lässt, ohne dass eine elektrische Trennung der Simultan-Bahnstromstrecke von der normalen Einphasen-Leitungstrecke verlangt wird.

MITTEILUNGEN.

Die Druckleitung des Kraftwerkes 2 A am Big Creek. Bei dieser der Southern California Edison Co. gehörenden Hochdruck-Speicheranlage versorgt eine einzige Rohrleitung die beiden 56000 PS Turbinen mit Triebwasser. Da die grösste Wassermenge 15 m³/sec, der grösste statische Druck rd. 740 m W. S. beträgt, führte die Wirtschaftlichkeitsrechnung zu Wandstärken bis 76 mm. Dazu mussten im untersten Teile nahtlos geschmiedete Rohre verwendet werden. Eine weitere Voraussetzung für die Brauchbarkeit dieser Lösung war die leichte Revisionsmöglichkeit während den alljährlichen Betriebspausen. Der Zeitschrift „Eng. News-Record“ vom 26. Sept. 1929 entnehmen wir die folgenden Ergebnisse der wirtschaftlichen Ueberlegungen mit den nötigen technischen Daten:

Ausführungsart der Leitung	genietet	bandagiert	nahtlos geschmiedet
Für eine Rohrlänge in m	556	930	538
Für Wasserdrücke in m W. S. von	0	170	501
bis	170	501	740
Kleinste Wandstärke in mm	13	32	63
für Durchmesser in mm	2740	2130	1673
Grösste Wandstärke in mm	32	63	76
für Durchmesser in mm	2130	1673	1673
Zulässige Beanspruchung kg/cm ²	700	700	843
Reibungskoeffizient nach Kutter			
angenommen zu	n = 0,016	0,012	0,012

Die angegebene „Wandstärke“ der Bandagenrohre bezieht sich auf ein „normales“ Rohr, das pro Längeneinheit die gleiche mittlere Fläche besitzt, wie Rohr und Bandage zusammen.

Es wurde nicht als nötig errachtet, bei diesen zulässigen Beanspruchungen den Wasserschlag besonders zu berücksichtigen. Bemerkenswert ist auch die Angabe, dass zur Herstellung von 1 t nahtlos geschmiedeter Rohre 3 t Rohmaterial benötigt wurden. Jedes Rohr wurde in der Fabrik auf den doppelten statischen Druck geprüft, und ferner ein Bandagenrohr und ein geschmiedetes bis zum Bruch belastet. — Um zuverlässige Grundlagen zur Bemessung der