Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 47 (1956)

Heft: 14

Artikel: Bündelleitungen

Autor: Hammel, S. / Mors, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060098

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

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

47. Jahrgang Nr. 14 Samstag, 7. Juli 1956

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN
DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Bündelleitungen

621.315.145

Es wird über die in Deutschland gebauten Bündelleitungen berichtet.

Nach kurzen Darlegungen über elektrische Daten der Bündelleitungen geht der Autor des I. Teils auf Material und Abmessungen der Teilleiter, sowie auf die Anzahl und den Typ der eingebauten Isolatoren, unter besonderer Würdigung der Langstabisolatoren, ein. Anschliessend wird zur Frage der Schutzarmaturen Stellung genommen und eine kurze Beschreibung der verwendeten Hänge- und Abspannklemmen sowie der Feldabstandhalter gegeben. Zum Schluss wird erwähnt, dass in Sonderfällen auch kurze Mittelspannungs-Hochstromleitungen als Bündelleitungen ausgeführt werden.

In Teil II werden die Mastbilder erklärt. Die Frage der Seilspannung, ferner Fragen, die mit der Mastkonstruktion und der Gründung der Maste zusammenhängen, werden behandelt. Nach der Beschreibung der üblichen Erdungsart wird die Montage geschildert. Dabei sind vor allem die Besonderheiten, die sich beim Verlegen der Bündelleiter ergeben, erwähnt.

Cet exposé en deux parties traite les caractéristiques électriques des lignes en faisceaux construites en Allemagne.

L'auteur de la I^e partie s'occupe de la composition et des dimensions des conducteurs partiels, ainsi que du nombre et du type des isolateurs utilisés, notamment des isolateurs à long fût. Il prend ensuite position au sujet de la question des armatures de protection et décrit brièvement les pinces de suspension et d'ancrage, ainsi que les dispositifs servant à maintenir l'écartement nécessaire entre les champs. Pour terminer, il indique que, dans des cas spéciaux, on a également exécuté en faisceaux de courtes lignes à forte intensité pour des tensions moyennes.

L'auteur de la IIe partie donne des explications au sujet des pylônes et traite de la question de la tension mécanique des câbles, ainsi que des questions qui se rapportent à la construction des pylônes et à leurs fondations. Après une description du genre de la mise à la terre, il indique le mode de montage, en insistant sur les particularités qui résultent de la pose des conducteurs en faisceaux.

I. Teil

Von *S. Hammel*, Mannheim

A. Einleitung

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden elektrische Kraftwerke bevorzugt dort errichtet, wo billige Erzeugungsmöglichkeiten durch Wasserkräfte, Braunkohlen, Abfallkohlen usw. vorhanden sind. Da die dadurch bedingte Lage der Kraftwerke in vielen Fällen nicht mit dem Verbrauchszentrum der elektrischen Energie zusammenfällt, muss ein Energietransport über elektrische Fernleitungen erfolgen. Die Notwendigkeit zum Transport grosser Energiemengen besteht auch dort, wo hydraulische und thermische Energie-Erzeugung miteinander gekoppelt werden müssen, da die hydraulische Energie in vielen Fällen nicht das ganze Jahr hindurch in der erforderlichen Höhe zur Verfügung steht. Die Steigerung des Verbrauchs an elektrischer Energie führt dazu, dass immer grössere Energiemengen transportiert werden müssen. Die Grösse der zu transportierenden Energiemenge und die teilweise recht beträchtlichen Übertragungsentfernungen zwingen zum Übergang auf immer höhere Übertragungsspannungen. Die höchsten zurzeit in Deutschland angewendeten Übertragungsspannungen sind 220 und 300 kV. Mit Rücksicht auf die erwartete Entwicklung des Energietransportes werden aber heute schon Leitungen für eine Betriebsspannung von 380 kV geplant und gebaut. Da die natürliche Leistung einer Hochspannungsleitung, d. h. die Leistung, bei deren Übertragung Strom und Spannung gleiche Phasenlage am Anfang und am Ende der Leitung haben, um so höher ist, je grösser die Betriebs-Kapazität und je kleiner die Betriebs-Induktivität der Leitung ist, besitzen Leitungen mit mehreren Teilleitern pro Phase — sogenannte «Bündelleitungen» — eine höhere natürliche Leistung als Leitungen mit einem Leiter pro Phase. Aus diesem Grunde und weil Leitungen mit mehreren Teilleitern pro Phase mit Leiterseilen normalen Aufbaues und normalen Durchmessers ausgerüstet werden können, hat man sich in Deutschland dafür entschieden, 220- und 380-kV-Leitungen mit Bündelleitern auszustatten. Aus der Praxis des deutschen Freileitungsbaues mit Bündelleitern soll im Nachstehenden berichtet werden.

B. Allgemeines

Es ist in Deutschland allgemein üblich, wichtige Hochspannungsleitungen als Doppelleitungen auszuführen. Massgeblich dafür ist, dass eine Doppelleitung geringere Errichtungskosten verursacht und weniger Bodenfläche beansprucht als zwei Einfachleitungen und dass erfahrungsgemäss Störungen bei Doppelleitungen in den meisten Fällen nur ein System betreffen, das andere aber noch zur Übertragung zur Verfügung steht. Die Planung der

deutschen 380-kV-Leitungen erfolgt durch die Deutsche Verbundgesellschaft, in der die grossen Elektrizitäts-Versorgungsunternehmungen (EVU) und die Elektro-Grossfirmen vertreten sind. Ursprünglich sah die Planung vor, die Leitungen als 220-kV-Doppelleitungen zu bauen und sie später auf 380-kV-Einfachleitungen umzustellen. Mit Rücksicht auf die auf weite Sicht erwarteten Übertragungsleistungen entschloss man sich aber schon bald, auch die 380-kV-Leitungen von vornherein als Doppelleitungen zu bauen. Bei der Wahl des Mastkopfbildes entschied man sich grundsätzlich für das sogenannte «Donau-Mastbild», d. h. für die Anordnung der Leiter in zwei horizontalen Ebenen — an der oberen Traverse rechts und links des Mastes je ein Leiter, an der unteren Traverse rechts und links des Mastes je zwei Leiter.

Mit Rücksicht auf Koronaverluste und Störungen der drahtlosen Nachrichtenübermittlung soll die maximale Oberflächen-Randfeldstärke der Leiter den Wert von 21...22 kV/cm nicht überschreiten. Diese Forderung, zusammen mit dem optimalen Teilleiterabstand von etwa 400 mm für 380 kV, führt bei einer mittleren Spannweite von etwa 350 m und den dabei erforderlichen Abständen der Leiter voneinander und von Erde zu einem Seildurchmesser von 21 bis 22 mm, wenn mit Rücksicht auf möglichst grosse natürliche Leistung dem Vierer-Bündel der Vorzug gegeben wird. Für 220 kV ergibt sich unter den gleichen Gesichtspunkten für eine mittlere Spannweite von etwa 325 m ebenfalls ein erforderlicher Seildurchmesser von 21 bis 22 mm, wenn die Leitung als Zweier-Bündel ausgeführt wird. Diese Tatsache ist sehr willkommen mit Rücksicht auf die Möglichkeit eines etappenweisen Ausbaues der Höchstspannungsleitungen. Wenn die heute zu übertragende Energiemenge mit 220 kV noch wirtschaftlich übertragen werden kann, so wird auf Masten, die für 380 kV und Vierer-Bündel dimensioniert sind, vorerst ein Zweier-Bündel aufgelegt und beim späteren Übergang auf 380 kV wird durch Hinzufügen von zwei weiteren Teilleitern gleichen Aufbaues und Durchmessers das erforderliche Vierer-Bündel geschaffen.

Einige Eletrizitäts-Versorgungsunternehmungen (EVU) sind dazu übergegangen, auch für 110 kV das gleiche Seil zu verlegen, das im Zweier- und Vierer-Bündel verwendet wird. Dadurch wird die Lagerhaltung in Seilen, Armaturen und Werkzeugen wesentlich vereinfacht. Ausserdem besteht die Möglichkeit, bei entsprechender Ausbildung der Maste eine 110-kV-Einseilleitung durch Hinzufügen eines zweiten, gleichen Teilleiters in eine 220-kV-Bündelleitung umzubauen.

Während normalerweise die 380-kV-Leitungen mit Vierer-Bündeln ausgerüstet werden, wurde in einem Gebiet, in dem besonders hohe Zusatzlasten zu erwarten sind, ein Zweier-Bündel mit Teilleitern von 32 mm Durchmesser verlegt mit Rücksicht darauf, dass sich dann nur an 2 Seilen die hohe Zusatzlast ansetzen kann und der gesamte Zug eines Bündels geringer wird.

Die charakteristischen Daten der deutschen Bündelleiter-Doppelleitungen sind in Tabelle I zusammengefasst.

Bei Leitungen, bei denen im Endausbau 2 Teilleiter pro Phase vorhanden sind, werden die Teilleiter im allgemeinen in einer horizontalen Ebene angeordnet. Bei den Leitungen, die im Endausbau mit Vierer-Bündeln ausgerüstet werden, werden die beiden Teilleiter des ersten Ausbaues für einen Betrieb mit 220 kV meistens in einer vertikalen Ebene angeordnet. In Anlagen mit Zweier-Bündeln mit vertikaler Teilleiteranordnung wird die Seilspannung des unteren Teilleiters meist etwas geringer gewählt als die Seilspannung des oberen Teilleiters, um die beiden Teilleiter hinsichtlich Schwingungen durch Wind zu verstimmen. Ob ein Unterschied in der Grösse des windbedingten Ausschwingwinkels und in der Schwingungsanfälligkeit zwischen horizontalen und vertikalen Zweierbündel-Anordnungen besteht, soll durch Beobachtung bestehender Anlagen und auf einem Versuchsstand noch näher untersucht werden.

C. Teilleiter

Als Teilleiter werden in deutschen Bündelleiter-Anlagen nur Stahlaluminium-Seile verwendet. Stahlaluminium-Seile sind wirtschaftlicher als Kupferseile, da der Preis pro km Stahlaluminium-Seil bei gleicher Leitfähigkeit wesentlich geringer ist als der Preis pro km Kupferseil. Ausserdem besitzen Stahlaluminium-Vollseile mit genormtem Aufbau bei dem aus Gründen der Oberflächen-Randfeldstärke erforderlichen Seildurchmesser den Aluminium-Querschnitt, der zur wirtschaftlichen Übertragung der natürlichen Leistung erforderlich ist. Bei Anwendung von Kupfer als Leiter-Werkstoff könnten bei Belastung mit der wirtschaftlichen Stromdichte keine Vollseile normalen Aufbaues

Charakteristische Daten der deutschen Bündelleiter-Doppelleitungen

Tabelle I

Leitung Nr.	Betriebspannung kV	Teilleiter				Mittelwert der maximalen Randfeldstärke kV/cm	Wellenwiderstand Ω/km	Natürliche Leistung MVA
		Anzahl	Anordnung	Durchmesser d mm	Abstand voneinander a mm			
zum Vergleich	220	1	—	28,1	—	21,5	387	126
1	220	2	horizontal	19,2	400	20,9	297	163
2	220	2	horizontal	21,7	350	19,1	290	167
zum Vergleich	380	1	—	50	—	20,7	376	383
3	380	4	quadratisch	21,7	400	20,5	240	602
4	380	4	quadratisch	21,0	400	21,2	242	598
5	380	2	horizontal	32	400	22,0	286	505

verwendet werden. Es müsste vielmehr der Leiterdurchmesser mit Rücksicht auf die Oberflächen-Randfeldstärke künstlich vergrössert werden (Hohlseil usw.).

Da die langjährigen Erfahrungen mit ordnungsgemäss hergestellten und gefetteten Stahlaluminium-Seilen auch in Industriegebieten mit säurehaltigen Abgasen und Schmutzablagerungen aller Art zufriedenstellend sind, besteht auch — abgesehen von Sonderfällen — keine Veranlassung, mit Rücksicht auf Korrosionsgefährdung Leiterseile aus Kupfer statt aus Stahlaluminium zu wählen.

Bei den in Tabelle I aufgeführten Leitungen gelangten Stahlaluminium-Seile mit dem in Tabelle II angegebenen Aufbau zur Verlegung.

ben für Freileitungen mit starr geerdetem Sternpunkt

bei einer *Betriebsspannung von 220 kV:*

einen Messmittelwert der
Regenüberschlagspannung (50 Hz) von 445 kV
und
Stehstoßspannung (1|50) von . . . 780 kV

vor und

bei einer *Betriebsspannung von 380 kV:*

einen Messmittelwert der
Regenüberschlagspannung (50 Hz) von 845 kV
und
Stehstoßspannung (1|50) von . . . 1450 kV

Aufbau der Stahlaluminiumseile der Tabelle I

Tabelle II

Leitung Nr.	Norm-bezeichnung Al/St mm²	Seil-Durch-messer d mm	Aluminium-Drähte Anzahl × Durch-messer in mm	Stahl-Drähte Anzahl × Durch-messer in mm	Bemerkungen
1	185/32	19,2	26×3	7×2,4	nach DIN 48 204
2	240/40	21,7	26×3,4	7×2,7	nach DIN 48 204
2	240/80	23,7	36×2,9	12×2,9	ungenormtes Spezialseil für eine Teilstrecke mit abnormal hoher Zusatzlast
3	240/40	21,7	26×3,4	7×2,7	nach DIN 48 204
4	210/50	21,0	30×3,0	7×3,0	nach DIN 48 204
5	443/145	32,0	78×2,69	1×3,5 +18×3,09	ungenormtes Spezialseil für eine Teilstrecke mit abnormal hoher Zusatzlast

D. Erdseile

Bei den ersten deutschen 220-kV-Anlagen war der Sternpunkt über Erdschlußspulen geerdet. Diese Anlagen werden zur Zeit auf starre Erdung umgestellt. In Zukunft werden alle 220- und 380-kV-Anlagen mit starr geerdetem Sternpunkt betrieben werden. Da bei starr geerdetem Sternpunkt jeder Isolatoren-Überschlag einen einphasigen Kurzschluss bedeutet und die Kurzschlußströme sehr hoch sind, hat man sich entschlossen, statt der in gelöschten Netzen üblichen Erdseile aus verzinkten Stahldrähten in starr geerdeten Netzen Erdseile mit höherer Leitfähigkeit zu verwenden. Abgesehen von einem Fall, in dem in einer 220-kV-Anlage als Erdseil 2 verzinkte Stahlseile von 70 mm² Querschnitt parallel verlegt wurden, sind alle Bündelleitungen mit Erdseilen aus Stahlaluminium ausgerüstet worden. Bei 380-kV-Leitungen mit Vierer-Bündeln hat es sich als Norm herausgebildet, als Erdseil das gleiche Seil zu verwenden, das auch als Teilleiter verlegt wird. Diese Massnahme führt neben der schon erwähnten einfachen Lagerhaltung dazu, dass Leiterseile und Erdseile gleiche Zusatzlastverhältnisse aufweisen und bei gleicher Seilspannung gleiche Durchhänge besitzen. Die Leitungen unter Nr. 3 wurden mit Stahlaluminium-Erdseilen 240/40, die Leitungen unter Nr. 4 mit Stahlaluminium-Erdseilen 210/50 ausgerüstet. Die Leitungen nach Nr. 5 wurden mit Rücksicht auf die zu erwartenden hohen Zusatzlasten mit einem Stahl-Aldrey-Seil ausgestattet.

E. Isolatoren

In elektrischer Hinsicht muss die Isolation den Vorschriften VDE 0111 entsprechen. Diese schrei-

Unter Einhaltung dieser Mindest-Vorschriften wurde die Isolierung nach Tabelle III gewählt.

Wie aus Tabelle III zu ersehen ist, hat sich in Deutschland die Verwendung von Langstabisolatoren immer mehr durchgesetzt. Mit einer, aber auch nicht grundsätzlichen, Ausnahme sind alle Elektrizitäts-Versorgungsunternehmungen zur ausschliesslichen Verwendung von Langstabisolatoren in Höchstspannungsanlagen übergegangen. Der Grund hierfür liegt in der vorzüglichen Bewährung der nunmehr seit fast 20 Jahren hergestellten Langstabisolatoren. Hervorgegangen aus dem von der Motor-Columbus A.-G. entwickelten «Motor»- oder «Vollkernisolator», stellt der Langstabisolator eine Weiterentwicklung dieser bewährten Isolatorenform dar. Das wertvolle Merkmal der Undurchschlagbarkeit weisen beide Isolatorenarten auf. Langstabisolatoren besitzen aber gegenüber Vollkernisolatoren bei niedrigerem Preis noch folgende Vorteile:

a) Infolge zweckmässiger Formgebung — der Schirmdurchmesser ist nur gleich dem doppelten Strunkdurchmesser — sind Langstabisolatoren leichter und mit geringerer Streuung der Festigkeitswerte herstellbar.

b) Die geringe Gliederzahl erlaubt es, Langstabisolatorenketten bis zu den höchsten Betriebsspannungen in wirtschaftlicher Weise durch den Einbau geeigneter Armaturen unempfindlich gegen Kaskaden-Lichtbögen zu machen.

c) Das Gewicht von Langstabisolatorenketten ist geringer als das von elektrisch und mechanisch gleichwertigen Vollkernisolatorenketten.

Charakteristische Daten der Isolierung

Tabelle III

Leitung Nr.	Isolatorenart	Isolatoren-Anzahl	Verwendete Ketten an		Regenüberschlagspannung (50Hz) Messmittelwert ohne Lichtbogen-Schutzarmaturen kV	Stehstossspannung (1|50) ohne Lichtbogen-Schutzarmaturen kV	Mittelwert der Bruchlast eines Isolators kg	Zulässige Dauerlast eines Isolators kg
			Tragmasten	Abspannmasten				
1	VKL 75/14[1])	2	Einfach-	Doppel-	660	1180	10 000	2500
2a	VK 85/2[2])	6	Einfach-	Doppel-	545	1060	12 000	3000
2b[3])	VK 75/2 S[4])	7	Doppel-	Dreifach-	570	1110	13 000	3250
2c[3])	VK 75/2 S[4])	8	Doppel-	Vierfach-	640	1250	13 000	3250
3a	VK 75/2	11	Doppel-		850	1670	10 000	2500
3a	VK 85/2	10		Dreifach	860	1710	12 000	3000
3b	VKL 75/14 oder VKL 75/27 N[5])	3	Doppel-		920	1750	10 000	2500
3b	VKL 85/14 oder VKL 85/27 N[5])	3		Dreifach-	920	1750	12 000	3000
4	VKL 85/14	3	Doppel-	Dreifach-	920	1750	12 000	3000
5[3])	VKL 85/14	3	Doppel-		920	1750	12 000	3000
5[3])	VKL 105/14	3		Dreifach-	920	1750	16 500	4125

[1]) VKL 75/14 = Vollkern-Langstabisolator mit 75 mm Strunkdurchmesser und 14 Schirmen nach DIN 48 006.
[2]) VK 85/2 = Vollkernisolator mit 85 mm Strunkdurchmesser und 2 Schirmen nach DIN 48 006.
[3]) Gebirgsabschnitte mit erhöhter Zusatzlast.
[4]) Isolatoren mit erhöhter Festigkeit.
[5]) Isolatoren für Verschmutzungsgebiete.

Im ersten Ausbau für eine vorläufige Betriebspannung von 220 kV werden die Leitungen Nr. 3, 4 und 5 an normalen Tragmasten mit Einfachketten und an Abspannmasten mit Doppelketten ausgerüstet.

d) Die günstige äussere Formgebung bedingt geringere Verschmutzung und leichtere Selbstreinigung.

Die Einführung der Stückprüfung mit Ultraschall hat dazu geführt, dass mit Lunkern behaftete und poröse Isolatoren schon während der Fabrikation erkannt und ausgeschieden werden. Die Schadenstatistik der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW) weist nach, dass der Ausfall von Langstabisolatoren im Vergleich zu dem Ausfall von Vollkern- und vor allem von Kappenisolatoren verschwindend gering ist. Kappenisolatoren werden wegen ihrer Durchschlagbarkeit und den dadurch notwendig werdenden periodischen Isolatorenprüfungen im deutschen Leitungsbau so gut wie überhaupt nicht mehr verwendet.

F. Armaturen

1. Schutzarmaturen

Wie schon gesagt, lassen sich Langstabisolatoren in wirtschaftlicher Weise zuverlässig gegen die schädlichen Auswirkungen von Kaskaden-Lichtbögen schützen. Es besteht die Möglichkeit, dass die durch die neueingeführte starre Sternpunkt-Erdung bedingte zuverlässige und kurzfristige Abschaltung fehlerbehafteter Leitungen die Verwendung von Lichtbogen-Schutzarmaturen überflüssig macht. Da aber Lichtbogen-Schutzarmaturen ausserdem noch eine Verbesserung der Spannungsverteilung längs der Isolatorenkette bewirken, hat sich die deutsche Praxis vorerst für die Beibehaltung von Schutzarmaturen einfachster Art entschieden. Die jüngsten 220- und 380-kV-Leitungen haben Isolatorenketten, die am Leitungsende mit Schutzringen und zwischen den Isolatoren sowie am oberen Ende mit Spiralhorn-Armaturen ausgerüstet sind (Fig. 1, 2 und 3). Als Schutzringe werden im allgemeinen solche mit isolierten Streben verwendet, die — wie die Spiralhörner — den Vorteil der einseitigen Lichtbogenspeisung und damit einer starren Lichtbogenlenkung besitzen. Fig. 8 zeigt eine mit Ringen und Spiralhorn-Armaturen aus-

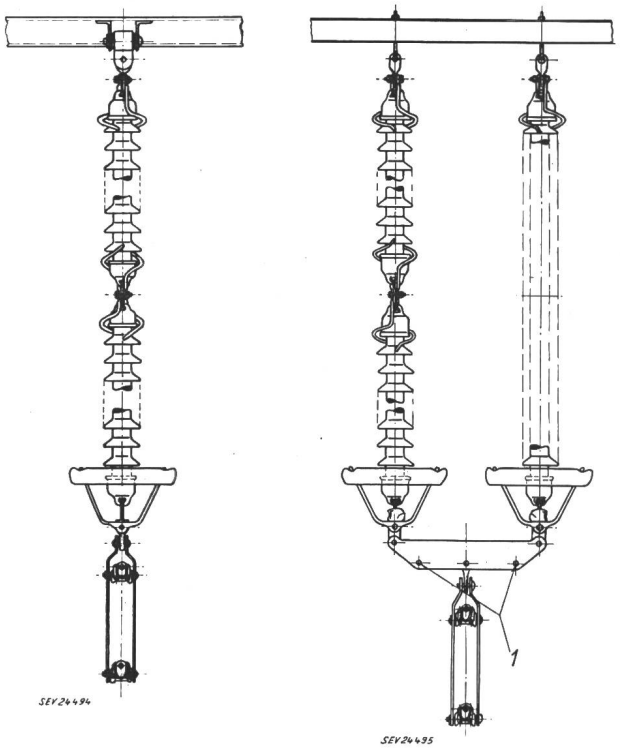

Fig. 1
Einfachhängekette
für 220 kV

Fig. 2
Doppelhängekette
für 220 kV
1 zusätzliche Bohrungen

gerüstete Abspannkette. Da infolge des thermischen Auftriebes Lichtbögen an Abspannketten nur nach oben brennen, werden Spiralhorn-Armaturen nur an

der Oberseite der Abspann-Isolatorenkette angeordnet und bei dem Schutzring ist nur die nach oben gerichtete Strebe vom Ring isoliert. Fig. 4 zeigt eine Isolatorenkette, die oben, in der Mitte und unten mit sogenannten «Schutzkorb»- oder «Kammwulst»-Armaturen ausgerüstet ist. Kammwulst-Armaturen bewirken, dass ein etwaiger Lichtbogen aus der

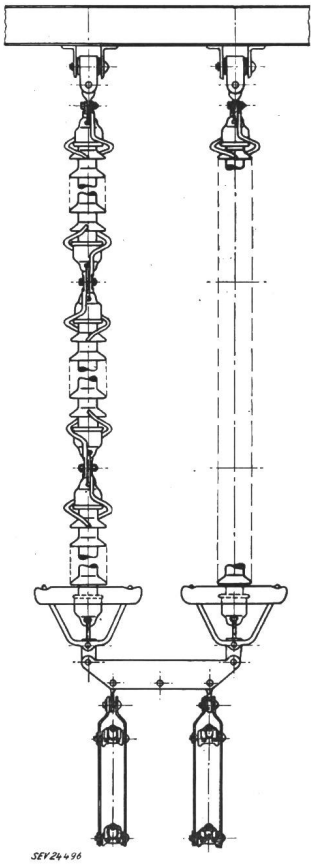

Fig. 3
Doppelhängekette für 380 kV

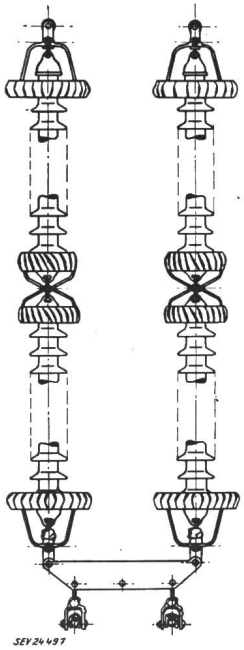

Fig. 4
Doppelhängekette für 220 kV

Kette herausgetrieben und, wenn er nicht durch Wind daran gehindert wird, um die Kette rotierend zwischen oberer und unterer Armatur brennt. Derartige Schutzarmaturen waren in gelöschten Netzen wertvoll, da sie den Lichtbogen häufig von selbst zum Erlöschen brachten. In Netzen mit starr geerdetem Sternpunkt ist ihre Wirkungsweise unerwünscht. Schädliche Auswirkungen von Kaskaden-Überschlägen werden auch bei Verwendung dieser Armatur zuverlässig vermieden. Die «klassische» Ausrüstung einer aus Vollkernisolatoren bestehenden 220-kV-Kette mit normalen Schutzringen unten und Schutzhornkreuzen oben wird in Fig. 5 gezeigt. Diese Anordnung kann schädliche Auswirkungen von Kaskaden-Lichtbögen, die sich an den Metallteilen innerhalb der Isolatorenkette festsetzen, nicht vermeiden.

2. *Hänge- und Abspannklemmen*

Alle verwendeten *Hängeklemmen* sind sogenannte «schwingende, im Schwerpunkt gelagerte Hängeklemmen», deren Masse mit Rücksicht auf Seilschwingungen möglichst gering gehalten wird. Die Lagerung der Hängeklemme erfolgt auf der Schneide eines Vierkantbolzens. Neben der älteren Ausführung mit Aluminium-Mulden und Stahl-Bügelschrauben (Fig. 5) werden heute vornehmlich Hängeklemmen mit sogenannten «Aluminium-Schalenmulden» nach Fig. 6 verwendet. Normale Aluminium-Mulden setzen die bei Temperguss-

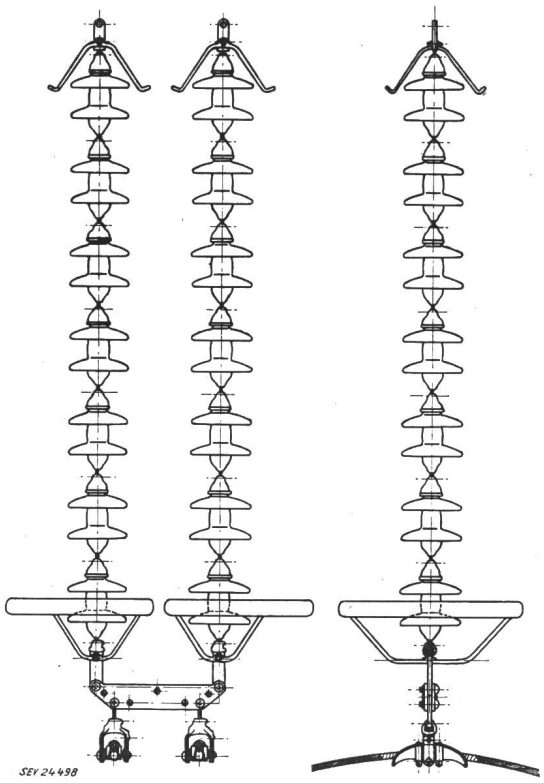

Fig. 5
Doppelhängekette für 220 kV

Mulden vorhandenen erheblichen Magnetisierungsverluste in den Hängeklemmen herab. Aluminium-Schalenmulden erhöhen ausserdem die Kurzschlussfestigkeit der Hängeklemme infolge des ausserordentlich geringen Übergangswiderstandes zwischen Teilleiterseil und Schalenmulde. Die Aluminium-Schalenmulde besitzt versenkte Befestigungsschrauben, um Sprüherscheinungen weitgehend zu vermeiden.

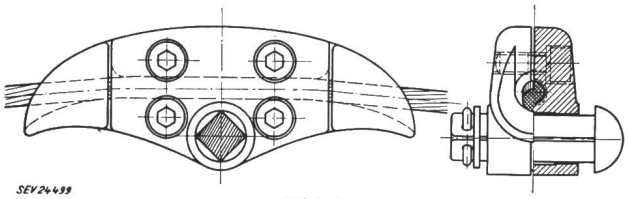

Fig. 6
Hängeklemme mit Aluminium-Schalenmulde

Als *Abspannklemmen* werden vornehmlich «Konus-Gelenk-Abspannklemmen mit Rändelstift» nach Fig. 7 verwendet. Die neueste Ausführung dieser Klemme besitzt auf der Gehäuseoberseite einen mit Schwalbenschwanz versehenen Schiebedeckel, der es gestattet, das Seil von oben in die Klemme ein-

zulegen. Das lästige Durchziehen des Seiles durch das Gehäuse wird vermieden. Durch den in das Seil eingeführten Rändelstift erzielt die Klemme besonders hohe Klemmfestigkeiten, die über den VDE-mässig geforderten Werten (mindestens 90 % der Seil-Nennlast) liegen. In neuerer Zeit werden auch Doppel-Keilklemmen und Keilklemmen mit Nachschubeinrichtung, die ebenfalls oben offen sind, verwendet.

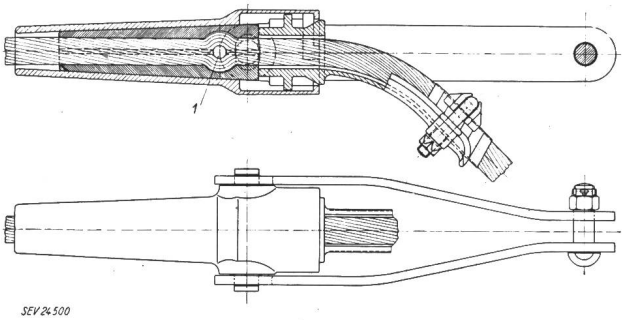

Fig. 7
Konus-Gelenk-Abspannklemme mit Rändelstift
1 Rändelstift

3. Sonstige Armaturteile für Hänge- und Abspannketten

Die Aufhängung von Hängeklemmen bei vertikalen Zweier-Bündeln und bei Vierer-Bündeln zeigen die Figuren 1, 2 und 3. Wenn im ersten Ausbau einer 380-kV-Leitung zur Aufhängung eines Zweier-Bündels an Masten mit erhöhter Sicherheit Doppelketten verwendet werden, so werden die Abstandhalter von vornherein mit 2 zusätzlichen Bohrungen versehen (Fig. 2), in die später beim Übergang von 220 auf 380 kV die Vierer-Bündel entsprechend Fig. 3 umgehängt werden können.

Horizontale Zweier-Bündel werden entsprechend den Figuren 4 und 5 an einem gemeinsamen Abstandhalter aufgehängt.

Bei Drei- und Vierfach-Abspannketten muss darauf geachtet werden, dass beim Bruch einer Isolatorenkette

a) die Belastung gleichmässig auf die intakten Ketten verteilt wird und

b) die Verlängerung der Abspannkette möglichst gering bleibt, damit die Stoßbeanspruchung durch die Energie der in Bewegung kommenden Massen niedrig bleibt.

Fig. 8 zeigt eine Mehrfachabspannkette, bei der durch den Einbau eines Knickstabes «K. St.» infolge der von diesem verbrauchten Formänderungsarbeit die Stossbelastung auf den Mast bei Bruch einer Isolatorenkette gedämpft werden soll.

Um Längendifferenzen zwischen den einzelnen Isolatorenketten ausgleichen zu können — die Längentoleranz für keramische Isolatoren beträgt bekanntlich 3 % — werden vielfach an den Abspanngelenken der Traversen in die mittlere Kette eine Lasche und in die äussere Kette eine verstellbare Nonius-Lasche oder ein Spannschloss eingebaut (Fig. 8).

Zum Ausgleich feiner Durchhangunterschiede werden zwischen Teilleiter-Abspannklemme und Abstandhalter ebenfalls Spannschlösser eingebaut (Fig. 8).

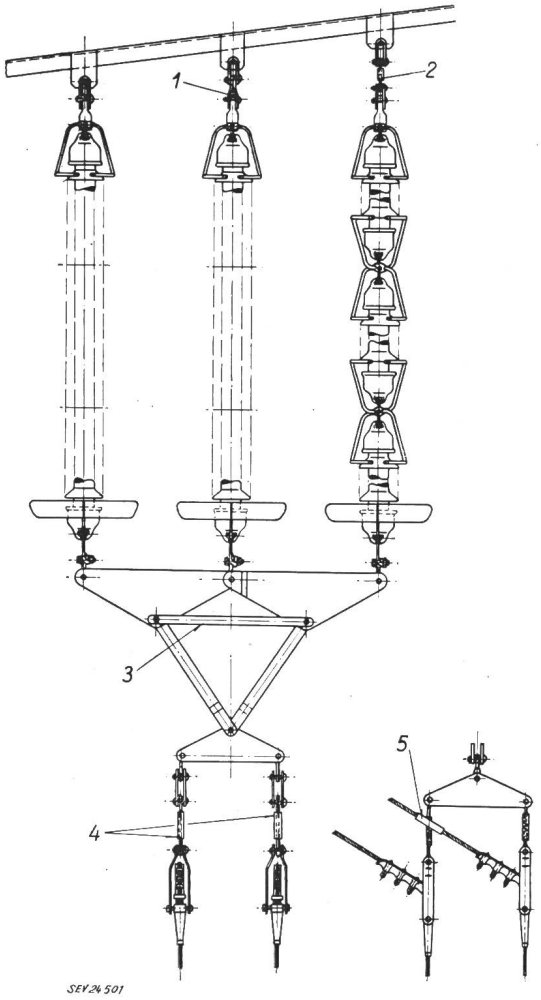

Fig. 8
Dreifach-Abspannkette für 380-kV-Viererbündel
1 Lasche; *2, 4* Spannschlösser; *3* Knickstab «K.St.»; *5* Schutztülle zur Vermeidung von Seilbeschädigungen durch Scheuern

4. Feldabstandhalter

Der Abstand der einzelnen Teilleiter voneinander muss mit Rücksicht auf die Oberflächen-Randfeldstärke im Verlauf des ganzen Leitungszuges möglichst konstant gehalten werden. An den Masten sind die Aufhänge- und Abspannvorrichtungen so ausgebildet, dass sie diese Aufgabe erfüllen. Zwischen den Masten wird der Normalabstand durch sogenannte «Feldabstandhalter», die etwa 20 bis 30 m vom Mast und im Feld in Abständen von etwa 60 m angeordnet werden, aufrecht erhalten. An die Feldabstandhalter wird die Forderung gestellt, dass ihre Masse mit Rücksicht auf die Seilschwingungen gering sei und dass die Klemmen eine möglichst allseitige Beweglichkeit besitzen, um Seilschwingungen und -Verdrehungen ungehindert durchlaufen zu lassen. Aus der verhältnismässig grossen Anzahl von Konstruktionen für Feldabstandhalter zeigen Fig. 9 und 10 zwei

Ausführungen, die in vertikalen und horizontalen Zweier-Bündeln verwendet wurden. Fig. 11 zeigt

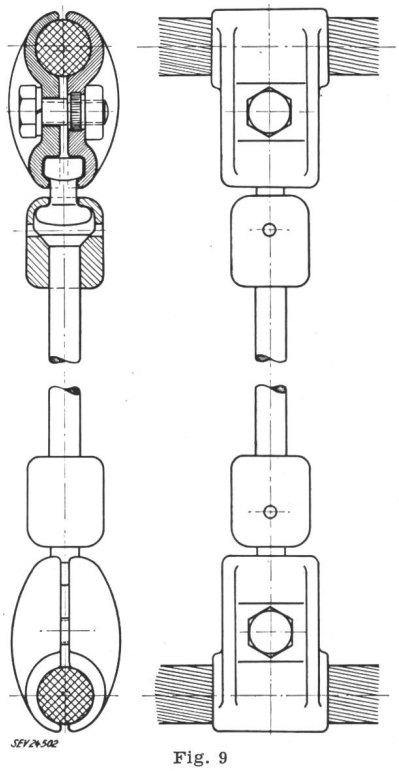

Fig. 9
Feldabstandhalter für Zweierbündel

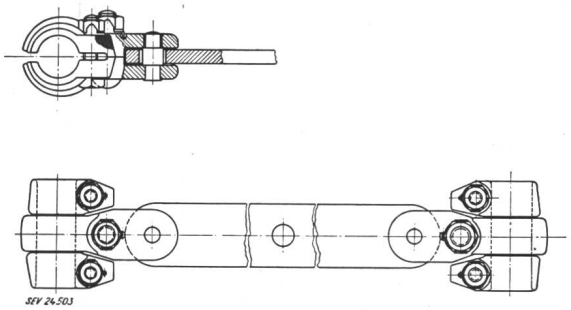

Fig. 10
Feldabstandhalter für Zweierbündel

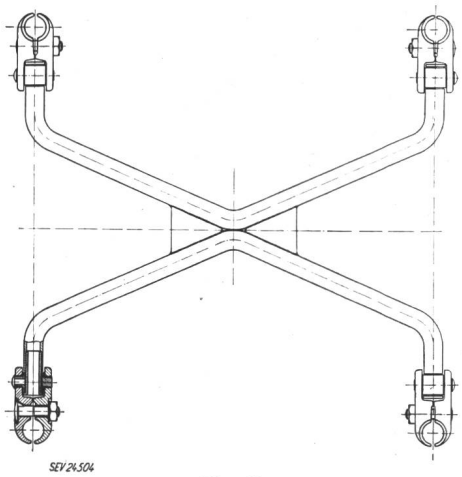

Fig. 11
Feldabstandhalter für Viererbündel

einen bei Vierer-Bündeln verwendeten Feldabstandhalter.

G. Hochstrom-Bündelleitungen

Neben «Höchstspannungs»-Bündelleitungen kommen in Sonderfällen auch «Hochstrom»-Bündelleitungen zur Ausführung. Eine solche Leitung ist in Fig. 12 zu sehen. In diesem Falle handelte es sich darum, eine grosse Leistung über eine verhältnismässig kurze Entfernung mit der Generatorspan-

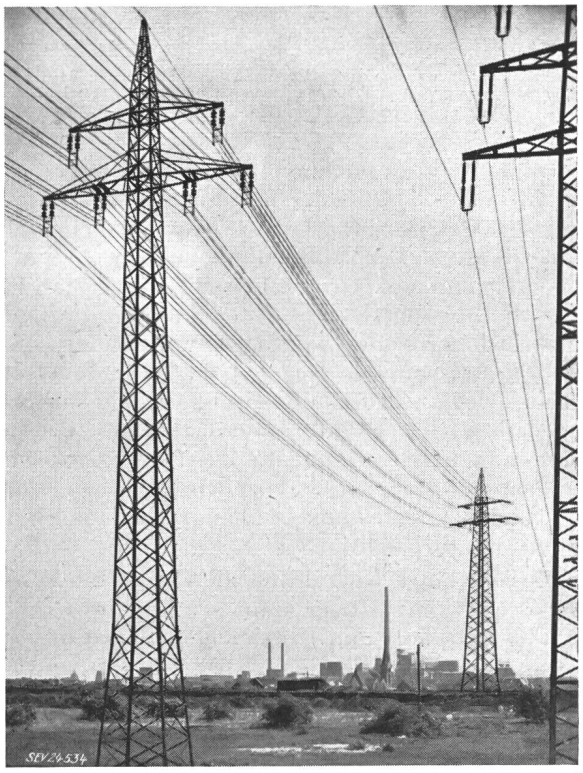

Fig. 12
10-kV-Hochstrom-Bündelleitung
Viererbündel

nung zum Verbraucher zu übertragen. Eine eingehende Untersuchung hatte ergeben, dass die Übertragung mit Generatorspannung und Bündelleitung in Bezug auf Anlage- und Übertragungsverlust-Kosten wirtschaftlicher sein würde als die Transformation am Leitungsanfang und -ende und der Bau einer Leitung mit erhöhter Übertragungsspannung. Die Unterteilung der Hochstromleitung in mehrere Leiter pro Phase bringt insofern Vorteile, als mehrere Teilleiter, die den gleichen Gesamtquerschnitt wie ein Einzelleiter besitzen, eine erheblich grössere Abkühloberfläche haben und deshalb mit höherer Stromdichte betrieben werden können. Ausserdem ist der induktive Spannungsabfall einer Bündelleitung geringer als der einer Leitung mit einem leitwertgleichen Leiter pro Phase. Statt, wie früher üblich, bei Vermeidung einer Transformation mehrere parallele Leitungssysteme zu verlegen, wurde bei der abgebildeten Leitung der billigere Weg der Ausführung als Bündelleitung gewählt. Um serienmässige Armaturen verwenden zu können, wurde ein Teilleiter-Abstand von 400 mm eingehalten, wobei allerdings die Seilaufhängungen an den Masten und die Feldabstandhalter federnd ausgebildet wurden, um Schäden zu

vermeiden, wenn im Kurzschlussfall die Teilleiter infolge der auftretenden grossen elektro-dynamischen Kräfte zusammenschlagen.

Literatur

[1] *Markt, G.* und *B. Mengele:* Drehstromfernübertragung mit Bündelleitern. E u. M. Bd. 50(1932), Nr. 20, S. 293...298.

[2] *Roser, H.:* 25 Jahre 220-kV-Betrieb im RWE-Netz. ETZ-A Bd. 76(1955), Nr. 1, S. 5...9.

[3] *Boll, G.* und *W. Fleischer:* Die Übertragungsspannung im deutschen Verbundnetz. ETZ-A Bd. 76(1955), Nr. 1, S. 10...13.

[4] *Die 400-kV-Forschungsanlage Rheinau.* Teil I: Planung und Ausführung. Heidelberg: 400-kV-Forschungsgemeinschaft e. V. 1955.

[5] *Boll, G.* und *H. Roser:* The Technical Problems of the German 380-kV-System. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1956, Rapp. 409.

Adresse des Autors:
Dipl. Ing. *S. Hammel,* Regierungsbaurat a. D., in Firma Brown Boveri & Cie., A.-G., Augusta-Anlage 7...11, Mannheim 2.

II. Teil

Von *H. Mors,* Mannheim

A. Mastbild

Die Leiterabstände und Leiterquerschnitte sind vor allem bei den 380-kV-Leitungen verhältnismässig gross. Der Bau der Tragwerke verursacht daher grosse Kosten. Die Aufwendungen werden um so grösser, wenn auf Grund besonderer meteorologischer Bedingungen nicht mehr mit der normalen Zusatzlast gerechnet werden kann, sondern grössere Zusatzlasten als Regel- oder Ausnahmelasten berücksichtigt werden müssen. Es ist daher notwendig, dass solche erhöhte Zusatzlasten möglichst genau den örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Bei Annahme der Zusatzlasten infolge Eis-, Rauhreif- und Schneebehang bleiben zusätzliche Windlasten unberücksichtigt.

Die Mastlänge wird durch die Grösse des Durchhanges bestimmt. Dieser kann bei Annahme erhöhter Zusatzlasten und ungleicher Belastung der Spannfelder weit über das normale Mass anwachsen; dazu kommt der Sicherheitsabstand zum Boden, der normalerweise bei 220-kV-Leitungen mit 8 m und bei 380-kV-Leitungen mit 9 m bemessen wird. Bei ungleicher Belastung der Spannfelder durch erhöhte Zusatzlasten werden besondere Festlegungen getroffen. Das Mastkopfbild richtet sich nach der Länge der Isolatorenketten und dem Ausschwingwinkel der Seile.

Die Anordnung der Leitungen in zwei Ebenen zum sogenannten Donaumastbild wird für 220- und 380-kV-Leitungen bevorzugt. Die Anordnung in einer Ebene, die in Gegenden, die durch erhöhte Zusatzlasten gefährdet sind, vorzuziehen wäre, kommt wegen der dafür erforderlichen Traversenausladungen nicht in Frage. Die Anordnung der Leitungen in drei Ebenen ist ebenfalls nicht üblich. Denn die Trassenverhältnisse sind in Deutschland nicht so beengt, dass man mit Rücksicht auf die Trassenführung an Hängen und vermehrten Waldaushieb auf diese Anordnung übergehen müsste. Dazu kommt, dass die grössere Höhe der Masten mit Anordnung der Leitungen in drei Ebenen die Tragwerke verteuert. Vor allem werden die Tragmaste schwerer; nach den deutschen Freileitungsvorschriften sind nämlich die massgebenden Windbelastungen auf Maste und Leitungen für Höhen über 40 m, die dann in jedem Falle überschritten werden, wesentlich höher anzunehmen.

In Fig. 13 sind die gebräuchlichen Mastbilder schematisch aufgezeichnet. Zunächst wird ein Rohrgittermastgestänge für eine 220-kV-Leitung mit Zweierbündeln, die in Norddeutschland erstellt wurde, gezeigt [Leitung Nr. 1[1])]; daneben sind 220-kV-Maste für eine Leitung mit Zweierbündeln, die durch den Schwarzwald verläuft, skizziert (Leitung Nr. 2). Die Maste der Leitung Nr. 2 haben einen besonderen Schutz gegen Blitzeinschläge durch zwei Erdseile, die an den Spitzen des oberen Auslegers befestigt sind. Anschliessend ist das Mastbild für 380-kV-Leitungen mit Viererbündeln (Leitungen Nrn. 3 und 4), das von der Deutschen Verbundgesellschaft genormt ist, dargestellt. Ausserdem ist das Mastbild für eine 380-kV-Leitung mit Zweierbündeln, die durch eine Gegend mit erhöhter Zusatzlast verläuft, eingetragen (Leitung Nr. 5). Das letzte Mastbild muss als Sonderfall betrachtet werden; es wurde für eine 10-kV-Hochstromleitung im Industriegebiet und eine Belegung mit Viererbündeln entworfen (I. Teil, Fig. 12).

Die Phasenabstände ergeben sich nach einer empirisch gefundenen Formel der deutschen Freileitungsvorschrift in Abhängigkeit von der Grösse des Durchhanges und der Länge der Tragkette zusammen mit einem Sicherheitszuschlag. Sofern Leitungen verschiedenen Querschnittes, verschiedenen Werkstoffes oder ungleicher Durchhänge verlegt werden, ist zur Nachprüfung dieser Abstände noch eine Ausschwinguntersuchung vorzunehmen. Dabei ist zu prüfen, dass auch dann keine unzulässige gegenseitige Näherung der Leitungen auftreten kann, wenn die vom Wind abgekehrten Leitungen mit bis zu 20 % geringerer Windgeschwindigkeit getroffen werden, während die dem Wind zugekehrten Leitungen voll ausschwingen.

Der Ausschwingwinkel ergibt sich aus dem Verhältnis der Grösse der waagrechten Windlast zur senkrechten Gewichtslast der Seile. Es ist üblich, mit Rücksicht auf Geländeunebenheiten und die dabei möglichen Kettenentlastungen die Gewichtsbelastung um ein bestimmtes Mass kleiner als die Windlast anzunehmen. Z. B. wurde bei Festlegung der Mastbilder für 380-kV-Leitungen die Belastungslänge für das Seilgewicht mit 250 m gegenüber der Belastungslänge für die Windlast mit 350 m angenommen. Dementsprechend vergrössert sich natürlich der Ausschwingwinkel. Daraus ergeben sich wohl etwas grössere Leiterseilabstände und Traversenausladungen; anderseits wird aber in den meisten Fällen vermieden, dass im Verlauf der Trasse Kettenentlastungen durch den Einbau von Belastungsgewichten oder Vergrösserung der Mastlänge oder gar erhöhte Anzahl von Abspannmasten ausgegli-

[1]) Die Leitungs-Nummern stimmen mit denen der Tabellen I, II und III des I. Teiles dieser Veröffentlichung überein.

chen werden müssen. Eine Verkleinerung der Ausschwingwinkel aus der Überlegung heraus, dass bei den grösseren Spannweiten die maximalen Windgeschwindigkeiten nur mit begrenzter Angriffsbreite wirksam werden, ist nach den Vorschriften nicht zulässig, da hierüber Erfahrungen fehlen. Die üblichen Ausschwingwinkel erscheinen aber reichlich bemessen; es ist daher beabsichtigt, durch Versuche, mit denen im vergangenen Jahr begonnen wurde [2]), eine Zuordnung von Windgeschwindig-

[2]) CIGRE-Bericht Nr. 220 (1956). Mors, Baer, Erich: Sollicitation des conducteurs exposés à la poussée du vent. Station expérimentale Hornisgrinde.

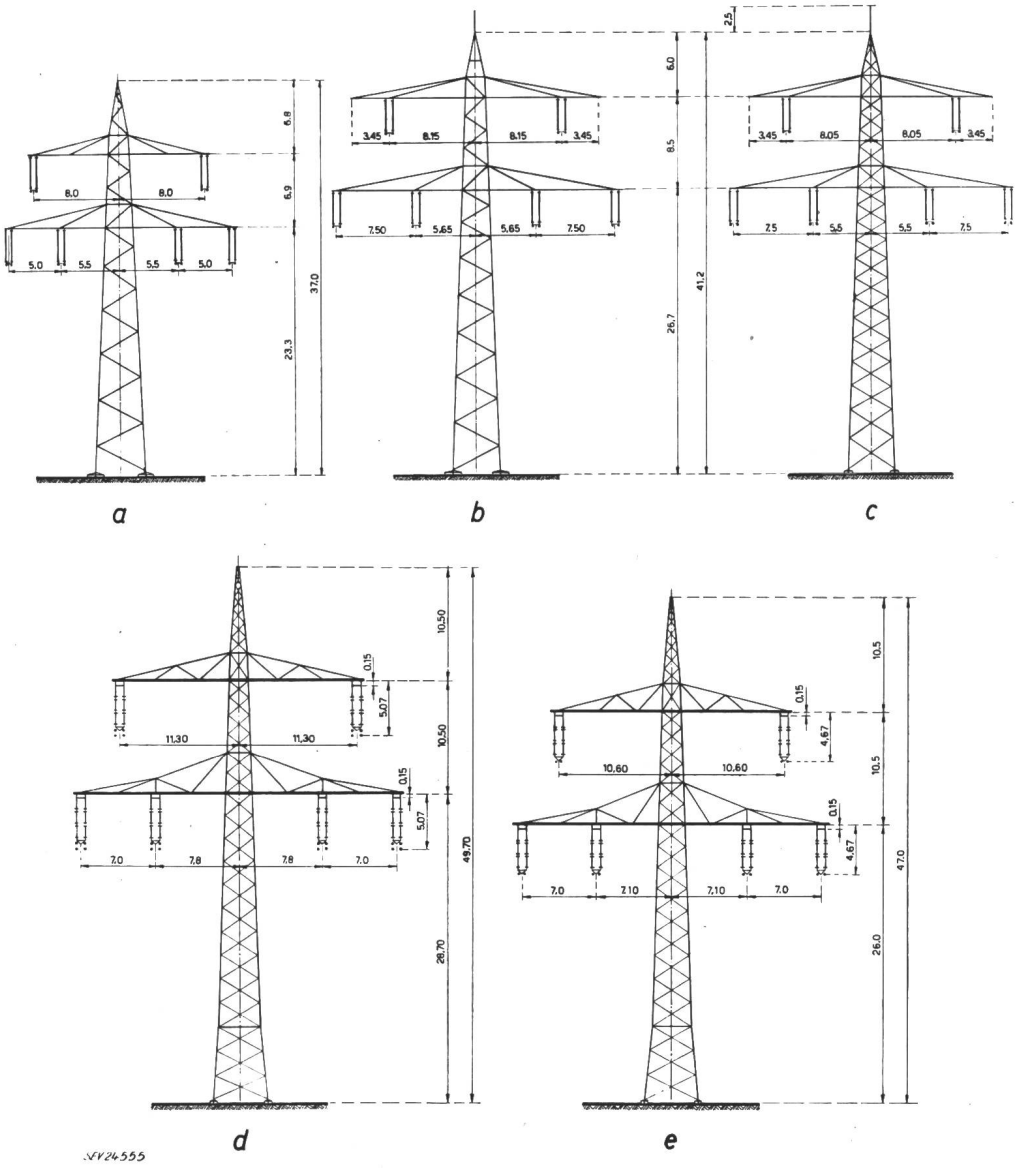

Fig. 13

Mastbilder

Angaben über die in Fig. 13 gezeigten Leitungen

Teil der Fig. 13	a	b	c	d		e	Einheit
Leitung Nr.	1	2	2	3 [1])	4 [1])	5	
				1. Ausbau 2 Stränge 220 kV	End-Ausbau 2 Stränge 380 V	End-Ausbau 2 Stränge 380 kV	
Leiterseile	Zweierbündel aus Stahl-Aluminium-Seilen Al/St 32/185	Zweierbündel aus Stahl-Aluminium-Seilen Al/St 40/240	Zweierbündel aus Stahl-Aluminium-Seilen Al/St 40/240	Zweierbündel Stahl-Aluminium Al/St 40/240 bzw. 50/210	Viererbündel Stahl-Aluminium Al/St 40/240 bzw. 50/210	Zweierbündel Stahl-Aluminium Al/St 447/143	mm²
Erdseil	1 × Stahl-Aluminium Al/St 72/99	2 × Stahl 70	2 × Stahl 70	1 × Stahl-Aluminium Al/St 40/240	1 × Stahl-Aluminium Al/St 40/240	1 × Stahl-Aldrey Aldrey/St 122/70	mm²
Maste	betongefüllte Rohrgittermaste	betongefüllte Rohrgittermaste	Winkelstahlgittermaste	Winkelstahlgittermaste	Winkelstahlgittermaste	Winkelstahlmaste	
Isolation	2 × Langstabisolatoren VKL 75/14	7 × Vollkernisolatoren VKL 75/2	7 × Vollkernisolatoren VL 75/2	2 × Langstabisolatoren VKL 75/14	3 × Langstabisolatoren VKL 75/14	3 × Langstabisolatoren VKL 75/14	
Spannweite	320	360	360	350	350	350 [2])	m
Baujahr	1953—1954	1953	1953	—	—	1954	

[1]) Regelausführung [2]) Die Leitung verläuft durch Gebiete mit erhöhter Zusatzlast

keit und Spannweite zum Ausschwingwinkel für deutsche Witterungsverhältnisse zu finden.

Der Sicherheitsabstand der ruhenden und der ausgeschwungenen Leitungen zu geerdeten Bauteilen muss bei Betrieb mit starr geerdetem Sternpunkt mindestens 0,8 $U_n/125$ in m sein. Bei Betrieb mit nicht starr geerdetem Sternpunkt muss der Sicherheitsabstand der ruhenden Leitungen mindestens $U_n/125$ in m betragen. Wenn die Leitungen ausschwingen, ist dann der Sicherheitsabstand mit mindestens $U_n/150$ in m zu bemessen. U_n ist die Nennspannung in kV.

Bei der Bestimmung der horizontalen Versetzung der Leiter wird berücksichtigt, dass auch bei einem infolge ungleicher Zusatzbelastung vergrösserten Durchhang der oberen Leiter keine gegenseitige unzulässige Näherung zu den darunter liegenden Leitungen auftreten darf. Im allgemeinen wird eine horizontale Versetzung von etwa 1 cm/kV als ausreichend angesehen. Mit so entworfenen Mastbildern wurden gute Erfahrungen gemacht.

Bei Beurteilung der Schutzwirkung der Erdseile gegen direkte Blitzeinschläge in die Leitungen werden die Empfehlungen der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen als massgebend angesehen. Der Schutzraum für Anordnung eines Erdseiles und zweier Erdseile für die in Fig. 13 gezeigten Mastbilder ist in Fig. 14 aufgezeichnet. Im allgemeinen wird die Anordnung eines Erdseiles als ausreichend erachtet. Bei dem Bau der oben erwähnten 220-kV-Leitung durch den Schwarzwald (Leitung Nr. 2) liessen besondere Erfahrungen es ratsam erscheinen, die Schutzwirkung durch Anordnung zweier Stahl-Erdseile mit 70 mm² Querschnitt zu erhöhen.

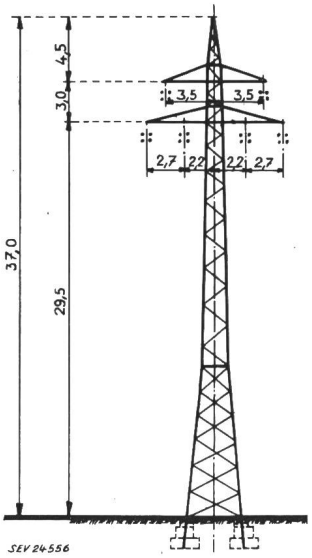

Fig. 14
10-kV-Hochstrom-Bündelleitung
(entspricht Fig. 12)

Leiterseile:
Viererbündel aus Kupferseilen von je 120 mm² Querschnitt
Erdseil:
1 × 120 mm² Kupfer
Maste:
Winkelstahlgittermaste
Spannweite: 230 m
Isolation:
Doppelhängeketten:
2 × 2 Glieder VK 75/2
Doppelabspannketten:
2 × 2 Glieder VK 85/2
Baujahr: 1953—1954

Für Freileitungen mit einem Erdseil, die mit starrer Nullpunkterdung betrieben werden, sieht man, wie erwähnt, zur Abführung der hohen Kurzschlußströme Seile mit grösserer Leitfähigkeit, in der Regel Stahl-Aluminiumseile, vor. Nach Möglichkeit werden die Erdseile mit kleinerem Durchhang gespannt als die Leiterseile, so dass die Schutzwirkung im Spannfeld verbessert wird.

B. Seilspannung

Die Leiterseile werden in der Regel so gespannt, dass 75 % der nach den Freileitungsvorschriften zulässigen Höchstzugspannung [3]), bezogen auf die Zusatzbelastung 0,18 $\sqrt{d}$ in kg/m bei — 5 °C, nicht überschritten werden, worin unter d der Seildurchmesser in m verstanden ist. Diese Seilspannungen sind in Kreuzungen über Eisenbahnen, Wasserstrassen usw. höchstens zugelassen; ausserdem hat es sich im Laufe der zurückliegenden Jahrzehnte erwiesen, dass so gespannte Leitungen ohne besonderen Schwingungsschutz wie armor rods, Schwinghebeldämpfer und dgl. schwingungssicher sind. Es kann angenommen werden, dass Bündelleiter infolge der gegenseitigen Kopplung der Teilleiter durch die Feldabstandhalter weniger zu Schwingungen neigen als Einzelseile, die den gleichen Querschnitt und Durchmesser wie die Teilleiter haben. Tatsächlich wurde bei Versuchen in einem Weitspannfeld [4]) ermittelt, dass bei gleicher Seilspannung Zweifachbündelleiter durch Schwingungen nur etwa 40 % der zusätzlichen Beanspruchung erfahren, die sich unter den gleichen Bedingungen bei den Einzelseilen, die den gleichen Querschnitt und Durchmesser wie die Teilleiter haben, einstellt. Ausserdem wurde festgestellt, dass die betreffenden Bündelleiter bei einer Seilspannung von 11 kg/mm² — bezogen auf VDE-Zusatzlast bei — 5° C — nur so schwingen wie die Einzelseile, die mit 9 kg/mm² gespannt sind. Die Versuche werden z. Z. auf einer Versuchsanlage mit drei normalen Spannfeldern [5]) fortgeführt.

Die geringere Schwingungsanfälligkeit der Bündelleiter kann derzeit durch Erhöhung der Verlegespannung wirtschaftlich nicht ausgenutzt werden, da, wie erwähnt, in Kreuzungen begrenzte Höchstzugspannungen vorgeschrieben sind und die Abspannmasttypen in der Trasse immer verhältnismässig häufig vorkommen. Die Abspannmaste würden aber trotz der kürzeren Mastlänge bei Erhöhung der Seilzugspannung schwerer; dieses Mehrgewicht kann durch die Gewichtseinsparung bei den Tragmasten nur ungenügend ausgeglichen werden.

Wenn die Leitungen durch Zusatzlasten höher beansprucht werden, ergeben sich unter Berücksichtigung der obigen Gesichtspunkte Seilspannungen, die gegebenenfalls bis zu den höchstzulässigen Zugspannungen anwachsen. Wenn man ausser den regelmässig auftretenden Zusatzlasten sogenannte Ausnahmezusatzlasten berücksichtigen muss, die nur gelegentlich auftreten, die aber bei der Festlegung der Verlegespannung beachtet werden müssen, können in diesem Falle die Seilzugspannungen sogar bis in die Nähe der Dauerzugfestigkeit anwachsen.

C. Mastkonstruktionen

Nach Kriegsende wurden die deutschen Freileitungsvorschriften überarbeitet und dem Stand der

[3]) (Höchstzugspannung für Al/St 5,7...6 nach VDE 0210: 11 kg/mm²).

[4]) CIGRE-Bericht Nr. 209 (1954) Mors, Baer, Erich: Recherches théoriques et expérimentales sur les balancements et vibrations affectant les lignes à grandes portées.

[5]) CIGRE-Bericht Nr. 220 (1956); siehe Fussnote 2 auf S. 625.

Technik angeglichen. Dabei erfasste man die Belastungsannahmen genauer und erhöhte die zulässigen Beanspruchungen erheblich. Es erschien angebracht, die Verminderung der Sicherheitsgrade für grosse Tragwerke durch Versuche als zulässig zu bestätigen. Diese wurden 1950/51 im Auftrag der Deutschen Verbundgesellschaft durchgeführt [6]). Durch das Ergebnis der Versuche wurden die getroffenen Berechnungsannahmen bestätigt. Auf diese Weise konnten bei der Erstellung neuer Freileitungsanlagen wesentliche Einsparungen erzielt werden.

In unebenem Gelände müssen die Mastfüsse angepasst werden; bei kleinerem Geländeunterschied genügt es, die Fundamente entsprechend höher zu ziehen; andernfalls müssen Zusatzkonstruktionen vorgesehen werden. Die Traversen der Maste für 380-kV-Leitungen werden in der Regel feuerverzinkt, um aus Sicherheitsgründen Anstricharbeiten in Nähe der unter Spannung stehenden Leitungen zu vermeiden. Eine vollständige Verzinkung der Maste ist nicht üblich. Um die Ausleger der 380-kV-Maste leichter begehbar zu machen, werden an

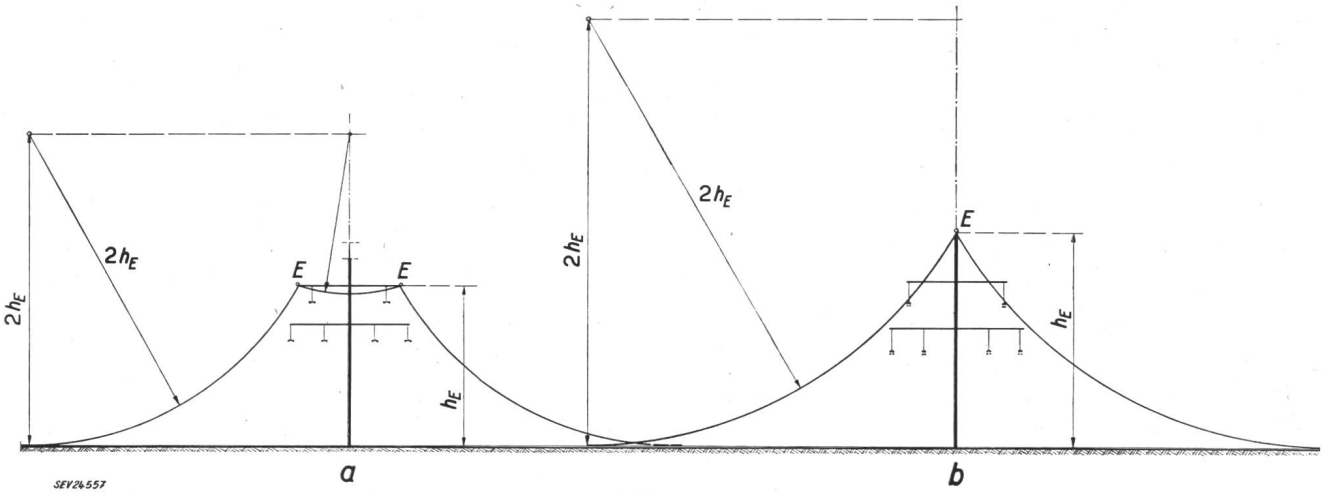

Fig. 15
Schutzräume von Erdseilen
a Schutzraum von zwei Erdseilen; 220-kV-Zweierbündel-Leitung *b* Schutzraum eines Erdseiles; 380-kV-Viererbündel-Leitung

Die Mastkonstruktionen bestehen meist aus Winkelstahl. Soweit es der Transport zulässt, werden die oberen Mastteile schussweise oder wandweise genietet. Auf diese Weise lässt sich der Zusammenbau der Maste auf der Baustelle beschleunigen.

Für einige Leitungen wurden Rohrgittermaste nach der Bauart Motor-Columbus/Mannesmann-Werke verwendet [7]). Diese Bauart hat gegenüber den früher üblichen Rohrgitterkonstruktionen den Vorteil, dass durch Betonfüllung der Eckstiele die Knickfestigkeit erhöht wird und ausserdem Wasseransammlungen im Rohrinnern und dadurch verursachte Frostschäden zuverlässig vermieden werden können. Durch diese Bauweise kann Stahl eingespart werden, und zwar um so mehr, je stärker die Tragwerke belastet werden. Die leichteren Transportverhältnisse spielen für deutsche Geländeverhältnisse keine ausschlaggebende Rolle. Gerade schwerere Leitungen können mit Rohrgittermasten unter etwa gleichen oder etwas niedrigeren Kosten erstellt werden, als sie sich bei der Verwendung von Winkelstahlmasten ergeben. Das gefällige Aussehen der Rohrgittermaste entscheidet dann oft. Im Schwarzwald wurden z. B. in einer 220-kV-Leitung 91 und in Norddeutschland ebenfalls in einer 220-kV-Leitung 167 Rohrgittermaste erstellt.

[6]) Deutsche Verbundgesellschaft e. V. Heidelberg: Mastumbruch- und Fundamentversuche Wendlingen 1951/52. Schwaben-Verlag A.-G. Stuttgart.

[7]) An der Entwicklung dieser Bauweise beteiligte sich die Firma Brown, Boveri & Cie., A.-G., Mannheim, Abt. Leitungsbau.

der unteren, weit ausladenden Traverse Gehstege und in Greifhöhe liegende Haltestäbe angeordnet; Steigeisen werden an einem Eckstiel bis zur Mastspitze vorgesehen. Zur Erleichterung der Arbeiten

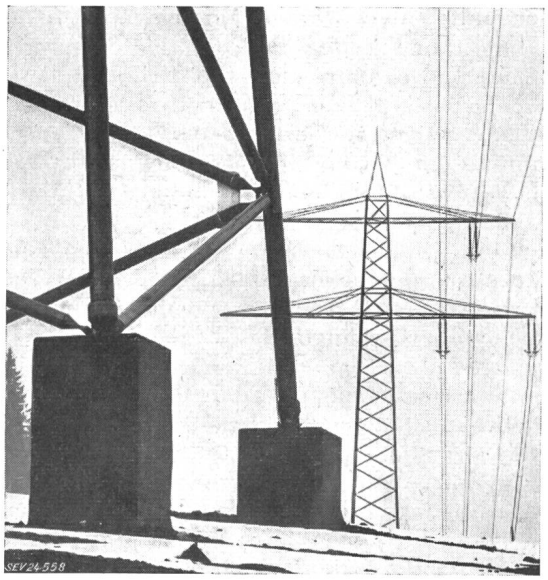

Fig. 16
220-kV-Tragmast in Rohrgitterkonstruktion

im Betrieb und als Sicherheitsmassnahme werden die Phasen durch Schilder gekennzeichnet.

Fig. 16 zeigt einen 220-kV-Tragmast in Rohrgitterkonstruktion; in Fig. 17 ist ein 380-kV-Trag-

mast in Winkelstahlkonstruktion, vorläufig belegt mit einem System für 220 kV, dargestellt.

Tabelle IV gibt eine Übersicht über die auf einen km Leitungslänge bezogenen Stahlgewichte und Betonmengen der ausgeführten 220- und 380-kV-Leitungen mit Bündelleitern. Die Gewichte steigen beim Leitungsverlauf durch Gegenden mit erhöhter Zusatzlast an; interessant ist die Einsparung von Mastgewicht bei Verwendung der Rohrgittermaste Bauart Motor-Columbus/Mannesmann-Werke.

Stahlgewichte und Betonmengen pro km-Leitung

Tabelle IV

Leitung Nr.	Mastart	Stahlgewichte t/km	Betonmengen m³/km
1	Rohrgittermaste	20,3	90,0
2[1])	a) Winkelstahlgittermaste	39 ...51	89...130
	b) Rohrgittermaste	36,5...36,8	104...107
3 u. 4	Winkelstahlgittermaste	59,5...70,5	122...149
5[1])	Winkelstahlgittermaste	73,0	107,0

[1]) Die Leitung verläuft durch Gegenden mit erhöhter Zusatzlast.

D. Gründung

Um das gesamte Bauwerk wirtschaftlich auszuführen, wird das Verhältnis von Tragwerkkosten zu den Gründungskosten eingehend untersucht. Die Spreizung der Maste, die sich bei der Bemessung der Gründung massgebend auswirkt, wird dadurch beeinflusst und eingeengt, dass die Bodennutzung in Deutschland sehr intensiv ist, so dass sehr grosse Mastspreizungen mit entsprechend kleineren Fundamenten in der Regel nicht möglich sind.

Die Eckstiele werden einzeln durch Stufenfundamente gegründet. Im allgemeinen wird bei der Festlegung der Fundamenttypen nach der Tragfähigkeit des Baugrundes unterschieden und danach, ob die Fundamente in standfestem Boden an diesen anbetoniert werden können, oder in weniger standfestem Boden dadurch eine entsprechend geringere Einspannung im Boden erhalten, dass die Baugrube bis zur Sohle geschalt werden muss. Die Fundamenttypen für einen 380-kV-Trag- und Abspannmast sind in Fig. 18 aufgezeichnet. In Fig. 19 wird die Ausbildung einer Gründung mit Mastfuss im Hochwassergebiet gezeigt.

Um die Standsicherheit der einzelnen Fundamente gegen Zugbeanspruchung möglichst zutreffend zu erfassen, wurden verschiedene Fundamentversuche durchgeführt. Das Ergebnis dieser Versuche trug dazu bei, dass die Tragfähigkeit mit mehr Sicherheit beurteilt und Material eingespart werden kann. Sofern Leitungsstrecken mit hohem Grundwasserstand auftreten, ist auch an eine Gründung der 220- und 380-kV-Tragmasten mit Betonfertigteilfundamenten und zwar mit sogenannten Einsetzfundamenten (Fig. 18c) gedacht. Bei Verwendung solcher Gründungen lassen sich vor allem die erhöhten Aufwendungen für Wasserhaltung einsparen.

Die Betonfundamente werden in der Regel nicht bewehrt; die Eckstiele gehen bis zur Sohle durch. Neben Stampfbeton verwendet man auch Rüttelbeton, der mit Hilfe von Tauchrüttlern verdichtet wird. Die Zementzugabe pro m³ Beton beträgt in der Regel 200 kg; auf eine einwandfreie Güte der Zuschlagstoffe wird grosser Wert gelegt. Wenn der Beton besonders geschützt werden muss, genügt in der Regel die Verwendung von Sonderzementen wie «Trasszement» oder «Thurament», ausserdem werden mitunter Schutzanstriche auf Bitumenbasis vorgenommen.

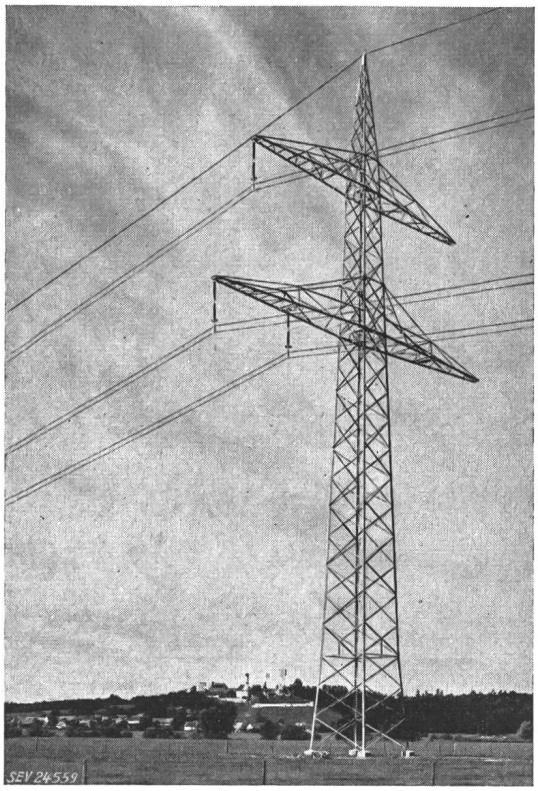

Fig. 17
380-kV-Tragmast in Winkelstahlkonstruktion

Die für die bisher ausgeführten Leitungen benötigten Betonmengen pro km sind in der Tabelle IV angegeben.

E. Erdung

Blitzeinschläge in das Erdseil oder in den Mast sollen durch niederohmige Widerstände nach der Erde abgeleitet werden. Der Ausbreitungswiderstand darf einen bestimmten Wert nicht überschreiten.

Da die 220- und 380-kV-Leitungen künftig grundsätzlich mit starr geerdetem Sternpunkt betrieben werden, muss bei Erdschluss eine schnelle Abschaltung erfolgen. Um Schritt- und Berührungsspannung herabzusetzen, erhalten die Masterdungen eine Potentialsteuerung, für welche beispielsweise zusätzlich zu einem am Mastfundament eng anliegenden Erdungsband aus verzinktem Bandeisen mit den Abmessungen etwa 40 × 4 mm in 0,1 m Tiefe unter Erdoberfläche Ringerder in 1 m Entfernung von den Betonfundamenten in 0,2...0,5 m Tiefe verlegt werden. In der Nähe verkehrsreicher Fahrwege, in Ortschaften usw. dürfen besonders vorgeschriebene Schritt- und Berührungsspannungen nicht überschritten werden. Fig. 20 zeigt in schematischer

Darstellung einen Ringerder um eine Gründung mit Einzelfundamenten. In der Regel reichen diese Massnahmen aus; Zusatzerder, wie Bodenseile zur weiteren Verbindung von Mast zu Mast, wurden bis jetzt noch nicht benötigt.

F. Montage

Die Winkelstahlmaste werden in der Regel gestockt; für die Montage der verhältnismässig schweren Mastwände, Mastschüsse und Traversen benötigt man einen oder zwei Stockbäume mit Längen bis zu 20 m. Die Rohrgittermaste werden ebenfalls mit Hilfe von Stockbäumen im unteren Teil stab- oder wandweise hochgeschraubt; danach werden für den oberen Mastteil ganze Schüsse und die Traversen hochgezogen und montiert.

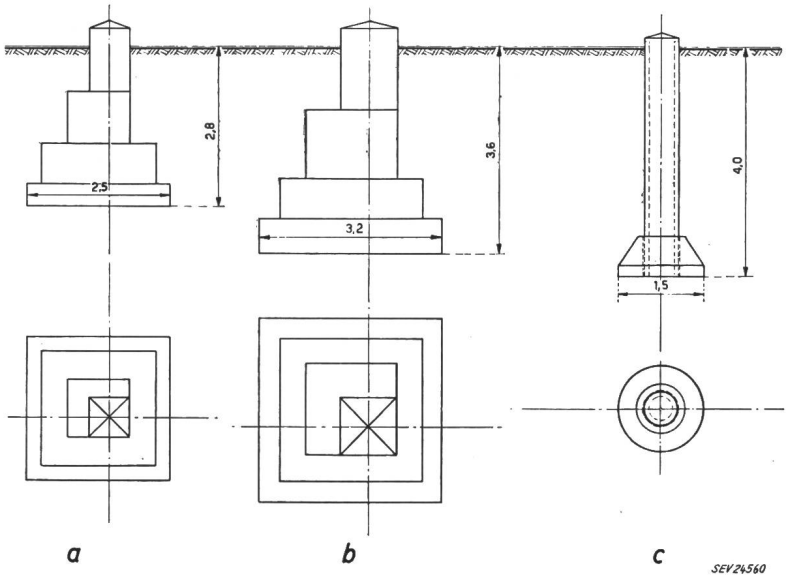

Fig. 18
Fundamente in normalem Baugrund für 380-kV-Leitungen
c Einsetzfundamente für Tragmaste
a für Tragmaste
b für Abspannmaste

Der Seilzug erfolgt schleiffrei, d. h. die Seile werden über Seillaufrollen gezogen und durch Abbremsen an der Seiltrommel und mittels einer zusätzlichen Bremseinrichtung bodenfrei gehalten. Die Seilspannung beträgt etwa 60 % der Höchstzugspannung. Eine sichere Verbindung mit Feldtelephonen zwischen Zug- und Bremseinrichtung muss gewährleistet sein. An Kreuzungen mit anderen Starkstromleitungen, Eisenbahnen, Strassen, Autobahnen, Wasserstrassen und ähnlichen Hindernissen werden besondere Massnahmen getroffen. Wenn eine gekreuzte Starkstromleitung abgeschaltet werden kann, empfiehlt es sich, deren Leiterseile während des Seilzugs abzunehmen. Kreuzungsstellen mit stark befahrenen Strassen und Eisenbahnen müssen durch sorgfältig ausgeführte Gerüste abgedeckt und geschützt werden.

Für den Seilzug der Bündelleiter können grundsätzlich die gleichen Maschinen, wie sie sonst üblich sind, verwendet werden, da es sich bei der Verlegung der Teilleiter um allgemein gebräuchliche Leiterseile handelt. Es hat sich als wirtschaftlich erwiesen, zwei Seile gleichzeitig auszuziehen. Für die verhältnismässig hohen Züge werden natürlich stärkere Vorseilwinden und Mehrfachseilbremsen benötigt. Die Seillaufrollen aus Leichtmetall müssen bedeutende Kräfte aufnehmen können; der Rollendurchmesser beträgt für die fraglichen Seildurchmesser etwa 60 cm. Bei allen Anordnungen müssen die Bündelleiter sehr genau einreguliert werden, um gleiche Durchhänge der nebeneinander liegenden oder genau differenzierte Durchhänge übereinander liegender Teilleiter zu erhalten. Bei der letzteren Anordnung soll durch das schwächere Spannen der unteren Teilleiter die Lage des Bündelleiters stabilisiert werden; ausserdem erwartet man infolgedessen eine verbesserte Schwingungsdämpfung der gesamten Bündelleiteranordnung.

Die Vorseilwinde trägt Stahlseillängen von 3000 bis 5000 m und wird durch Kupplung mit einem entsprechenden Motorfahrzeug angetrieben. Eine Mehrfachseilbremse und eine Regulierwinde während des Ausziehens eines Zweierbündels ist aus Fig. 21 ersichtlich.

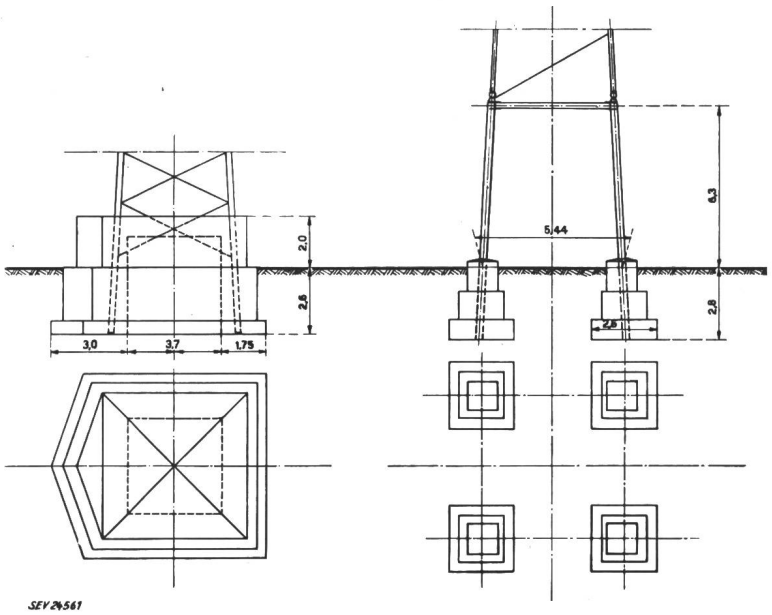

Fig. 19
Ausführungsbeispiele für Hochwasserfundamente

Die Feld-Abstandhalter werden mit Hilfe von Montagewagen, die von Hand oder motorisch angetrieben sind, eingebaut. Es wird dabei besonders darauf geachtet, dass ein Herausspringen der Rol-

len aus den Seilen mit Sicherheit vermieden wird und einwandfrei gebremst werden kann. Die Wagen haben sich auch in verhältnismässig grossen Steigungen in Weitspannfeldern gut bewährt. Fig. 22

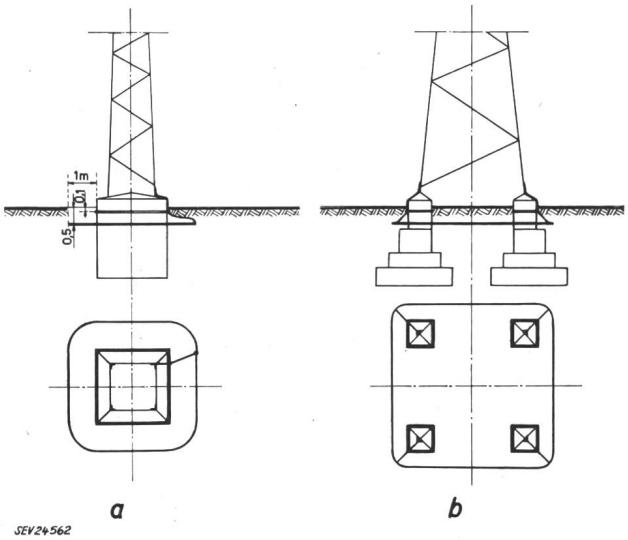

Fig. 20
Ringerder
a um ein Blockfundament
b um ein Vierblockfundament

zeigt das Setzen der Abstandhalter in einer Leitung mit Zweierbündeln in waagrechter Anordnung; Fig. 23 stellt das Umsetzen eines Montagewagens für Zweierbündel in senkrechter Anordnung an einer Hängekette dar.

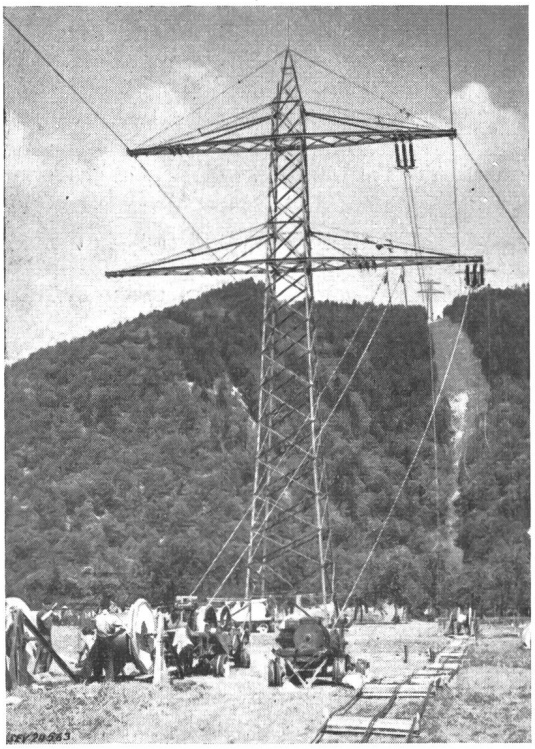

Fig. 21
Seilzugarbeiten
Ausziehen eines Zweierbündels

Fig. 22
Setzen der Feldabstandhalter im Zweierbündel mit waagrechter Anordnung

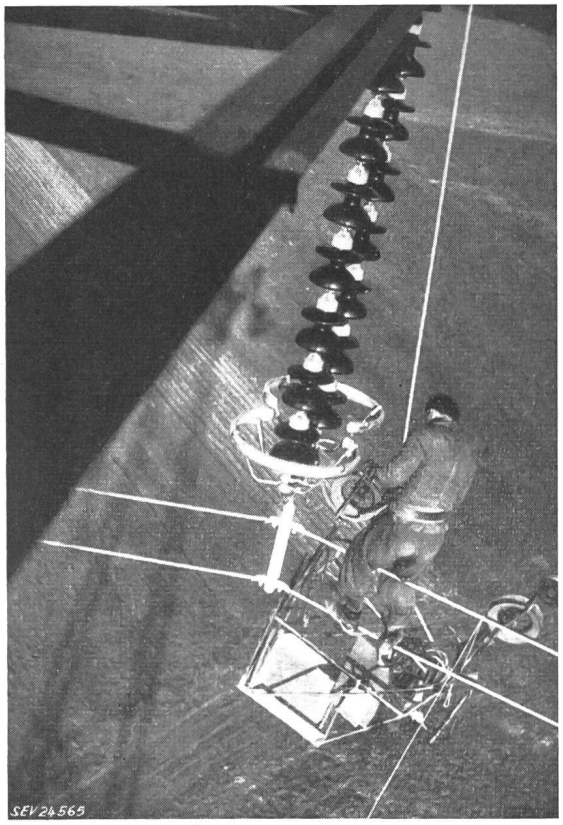

Fig. 23
Setzen der Feldabstandhalter
Umsetzen des Montagewagens für Zweierbündel mit senkrechter Anordnung an einer Hängekette

Das Einregulieren des Durchhanges erfolgt in der Regel durch Einvisieren mittels Messlatten; bei grossen Durchhängen und Höhenunterschieden muss der Durchhang mit Nivellierinstrumenten eingemessen werden. Um das sogenannte Recken der Seile zu berücksichtigen, ist es üblich, das Seil mit etwa 3 % kleinerem Durchhang zu verlegen.

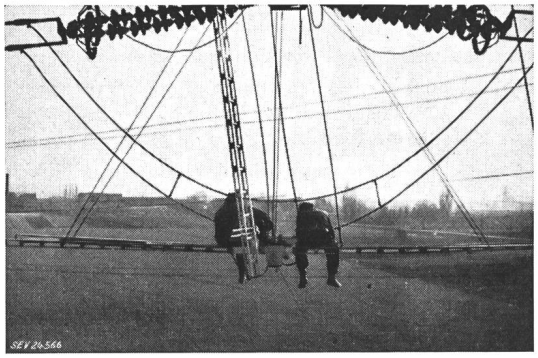

Fig. 24
Schliessen der Stromschlaufe eines Zweierbündels mit senkrechter Anordnung

Als zugfeste Feldverbinder werden in der Regel die Kerbverbinder eingebaut. Für das Stahlaluminiumseil 240/40 werden z. B. zwei Kerbverbinder mit je 52 cm Länge benötigt. Die Erfahrung zeigt, dass unter dem mechanischen Zug der Kontaktdruck so verstärkt wird, dass keine Störungen auftreten. In den zugentlasteten Verbindungen der Stromschlaufen ist vor allem dafür zu sorgen, dass der Kontaktdruck genügend gross ist, damit immer eine metallische Berührung zwischen Klemme und Seil vorhanden ist und eine Verschlechterung des Kontaktes durch Oxydation zuverlässig vermieden wird. In der Regel werden Kerbverbinder oder Deckelstromklemmen, mit kräftigen Federplatten zur Erzielung eines ausreichenden Kontaktdruckes versehen, eingebaut. Die sogenannte Alutherm-Schweissverbindung hat sich bis jetzt noch nicht im grossen Umfang durchgesetzt. Bei dieser Art der Verbindung erhält man an der Verbindungsstelle einen homogenen Gusskörper, der mindestens die gleiche Leitfähigkeit wie die verbundenen Seile hat. Für die zugentlastete Stromschlaufenverbindung braucht keine zusätzliche Verstärkung vorgesehen werden. Fig. 24 zeigt das Schliessen der Stromschlaufe eines Zweierbündels.

Mit dem Bau der ersten Bündelleitungen wurde in Deutschland vor 5 Jahren begonnen. Abgesehen von ganz vereinzelten Fällen, in denen infolge von Böen und Stürmen Zweierbündel umschlugen, ohne dass dadurch die Betriebsfähigkeit beeinträchtigt wurde, sind Störungen bis heute nicht bekannt geworden.

Adresse des Autors:
Dipl. Ing. *H. Mors*, Oberingenieur der Brown, Boveri & Cie., A.-G., Augusta-Anlage 7...11, Mannheim.

Erwärmung von Freileitungsseilen

Von *V. Lang*, Baden

621.315.145 : 621.3.017.71

Es wird die Verwendung eines Diagramms beschrieben, welches für einen beliebigen Leiter und für verschiedene Windgeschwindigkeiten, die Leiter-Erwärmung in Funktion der Belastung rasch abzulesen ermöglicht.

Description d'un abaque permettant de déterminer rapidement l'échauffement d'un conducteur quelconque, en fonction de la charge et pour différentes vitesses de vent.

Der Freileitungsbauer hat oft das Bedürfnis, auf einfache und rasche Weise die maximale Temperatur eines strombelasteten Freileitungsseiles bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten zu ermitteln. Das von der Motor-Columbus A.-G. in Baden seit mehr als 20 Jahren dazu benützte Diagramm (Fig. 1) ist universell verwendbar und hat sich im Gebrauch auf verschiedenen Leitungen als genügend genau erwiesen. Es entspricht den gestellten praktischen Anforderungen. Sein Aufbau soll kurz erläutert und an einem Beispiel die Anwendung gezeigt werden.

Die dem Diagramm zu Grunde liegenden Temperaturkurven, die Leiterübertemperatur in Abhängigkeit der Erwärmung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten, wurden in einem kleinen Windkanal experimentell ermittelt. Aus technischen Gründen war es seinerzeit nur möglich, die im Kurzschluss erwärmten Versuchsseile in Längsrichtung anzublasen, wodurch sich über eine genügend lange Meßstrecke eine gleichmässige Windverteilung erreichen liess und welches die Erzeugung von Windgeschwindigkeiten bis zu 12 m/s ermöglichte. Geprüft wurden verschiedene Leitermaterialien und Seilquerschnitte.

Die Messergebnisse gestatteten, die Koeffizienten k_1, k_2, k_3 und die Exponenten a und b der Wärmegleichung (1) für den stationären Zustand festzulegen. Bekanntlich stellt sich derselbe ein, sobald für eine gegebene Stromstärke die maximale Leitertemperatur erreicht ist und die gesamte Stromwärmeenergie in den Luftraum übergeht.

Es wird dann:

$$I^2 R = Q = \\ = k_1 \Delta t^a (1 + k_2 v^b) + k_3 \left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4\right] \quad (1)$$

Es bedeuten:

Q an die Luft abgegebene Wärmemenge in W/m² Seiloberfläche;

Δt Übertemperatur des Leiters, in °K;
v Windgeschwindigkeit in m/s;
T_1 Lufttemperatur, in °K;
T_2 Leitertemperatur, in °K;