Optimierungsmöglichkeiten bei Mittelspannungskabeln im Parallelbetrieb

Autor(en): **Brakelmann, H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **79 (1988)**

Heft 13

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904049

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Optimierungsmöglichkeiten bei Mittelspannungskabeln im Parallelbetrieb

H. Brakelmann

Es werden Untersuchungen zur Parallelschaltung von Mittelspannungs-Einleiterkabeln durchgeführt. Dabei ergeben sich Optimierungsmöglichkeiten sowohl hinsichtlich der Verlegeanordnung als auch der Phasenschaltung, die in erheblichem Masse die Belastbarkeiten und auch die Gesamtverluste beeinflussen. Die Optimierungsergebnisse hängen von den thermischen Verhältnissen in der Trasse ab, so dass gegebenenfalls auch Fremdwärmequellen zu berücksichtigen sind. Ein weiterer untersuchter Aspekt ist der Einfluss der Phasenfolge auf die Belastbarkeitsreserve im Fehlerfall.

Des études sont en cours sur le couplage parallèle de câbles unifilaires à moyenne tension. Il en résulte des possibilités d'optimisation concernant aussi bien la disposition de pose que le couplage en phase qui influent considérablement sur la capacité de charge et aussi sur les pertes totales. Les résultats de l'optimisation dépendent des conditions thermiques dans le tracé, c'est-à-dire qu'il faut aussi tenir compte d'éventuelles sources de chaleur. Un autre aspect qui a été étudié est l'influence de l'ordre des phases sur la réserve de capacité de charge en cas de défaut.

Der Verfasser dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die freundliche Unterstützung der Untersuchungen.

Adresse des Autors
Priv.-Doz. Dr. Ing. *H. Brakelmann*, Universität Duisburg, Fachbereich Elektrotechnik, Fachgebiet Elektrische Energieübertragung, Postfach 10 16 29, D-4100 Duisburg 1.

Vor allem im Mittelspannungsbereich werden zur Realisierung hoher elektrischer Übertragungsleistungen Parallelschaltungen mehrerer Einleiterkabelsysteme vorgenommen. Prinzipiell ist dann eine Verbindung zweier Netzbereiche gegeben, wie sie in Figur 1 am Beispiel dreier paralleler Einleiterkabel mit der Phasenfolge

L1-L2-L3--L3-L2-L1--L1-L2-L3

skizziert ist.

Allerdings lässt sich die Trassendurchgangsleistung nicht proportional zur Anzahl der parallelen Systeme steigern: Neben den thermischen Kopplungen wirken sich vor allem die induktiven Kopplungen zwischen allen metallenen Kabel-Aufbauelementen reduzierend auf den Belastbarkeitszuwachs aus. So ergeben sich von der Verlegeanordnung und von der Phasenaufteilung abhängige Koppelimpedanzen, die ihrerseits über die Leiterstrom-Aufteilung auf die parallelen Kabeladern wie auch - im Falle beidseitiger Schirm/Mantel-Erdungen[1] - über die Grösse der auftretenden Schirm-Längsströme und -Verluste entscheiden [1].

Nachdem in [1] das prinzipielle Verfahren zur Bestimmung der Strom- und Verlustaufteilungen und der resultierenden Trassendurchgangsleistungen parallel betriebener Kabel dargelegt worden ist, sollen im folgenden einige Untersuchungsergebnisse vorgestellt werden, die Folgerungen auf eine zweckmässige Auswahl der Verlegeanordnung und, abhängig hiervon, der Phasenfolge erlauben. Diese Ergebnisse stellen eine Ergänzung zu [2] dar, wo für drei bestimmte Phasenfolgen und für Standard-Verlegeanordnungen der Einfluss von Zusatzleitern auf Verluste und Belastbarkeiten untersucht wurde.

[1] Anstelle von «Schirm/Mantel»- wird in diesem Aufsatz vereinfachend nur «Schirm-» geschrieben.

1. Grundlagen

Ausgangspunkt für das prinzipielle Verfahren [1] ist die Annahme, dass die beiden zu verbindenden Netzbereiche durch ihre symmetrischen Impedanzen symmetrische Phasenströme I_L über die Kabel-Parallelschaltung erzwingen. Es ergibt sich ein Gleichungssystem, das die Zusammenhänge von Längsspannungsbelägen und Längsströmen der Kabelleiter und der Schirme über deren Koppelimpedanzbeläge beschreibt:

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_L \\ \hline \vec{U}_M \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \overleftrightarrow{A} & \overleftrightarrow{B} \\ \hline \overleftrightarrow{C} & \overleftrightarrow{D} \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} \vec{I}_L \\ \hline \vec{I}_M \end{bmatrix} \qquad (1)$$

mit $\vec{I}_L$ Leiterströme,
$\vec{I}_M$ Schirmströme,
$\vec{U}_L$ Leiter-Längsspannungsbeläge und
$\vec{U}_M$ Schirm-Längsspannungsbeläge

sowie den N · N-Matrizen ($\leftrightarrow$)

$\overleftrightarrow{A}$ Eigen- und Koppelimpedanzbeläge der Leiter,
$\overleftrightarrow{B}$ Koppelimpedanzbeläge zwischen Leitern und Schirmen,
$\overleftrightarrow{C}$ Koppelimpedanzbeläge zwischen Schirmen und Leitern
$\overleftrightarrow{D}$ Koppelimpedanzbeläge der Metallschirme.

In Mittelspannungskabelanlagen werden die Metallmäntel bzw. -schirme zur Vermeidung gefährlicher Berührungsspannungen beidseitig geerdet, so dass spürbare Zusatzverluste durch induzierte Längsströme auftreten können. Mit Nullsetzen der

Schirm-Längsspannungsbeläge folgen in diesem Falle die Schirm-Längsströme [1] zu

$$\vec{I}_M = -\overleftrightarrow{D}^{-1} \cdot \overleftrightarrow{C} \cdot \vec{I}_L \qquad (2)$$

und der Zusammenhang zwischen den Leiterströmen und den Leiter-Längsspannungsbelägen lautet

$$\vec{U}_L = \overleftrightarrow{Z}' \cdot \vec{I}_L = (\overleftrightarrow{A} - \overleftrightarrow{B} \cdot \overleftrightarrow{D}^{-1} \cdot \overleftrightarrow{C}) \cdot \vec{I}_L \qquad (3)$$

Durch Inversion der Leiter-Impedanzbelagsmatrix $\overleftrightarrow{Z}'$ ergibt sich

$$\vec{I}_L = \overleftrightarrow{Y}' \cdot \vec{U}_L \qquad (4)$$

woraus durch entsprechende Zeilenadditionen – die Summe aller einer Phase zuzuordnenden Leiterströme muss dem Phasenstrom gleich sein – der Zusammenhang zwischen den Phasenströmen und den Leiter-Längsspannungsbelägen jeder Phase folgt:

$$\vec{I}_P = \overleftrightarrow{Y}_P' \cdot \vec{U}_P \qquad (5)$$

mit $\overleftrightarrow{Y}_P'$ Phasenadmittanzbelagsmatrix vom Rang 3.

Bei Vorgabe der symmetrischen Phasenströme werden demnach

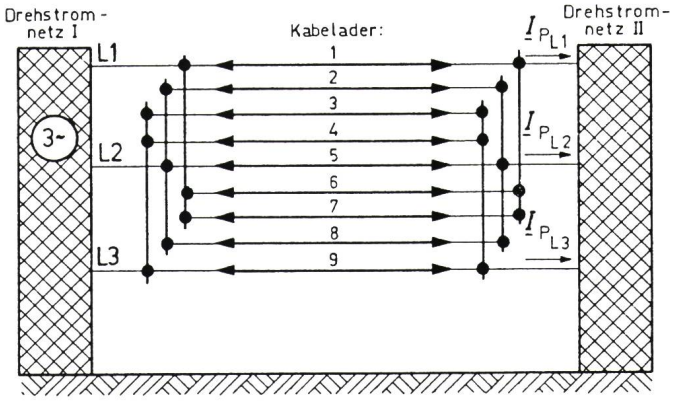
- die Leiter-Längsspannungsbeläge aus Gl. (5), aus diesen
- die Leiterströme aus Gl. (4) und anschliessend
- die Schirm-Längsströme aus Gl. (2)

berechnet. Mit Kenntnis dieser Grössen können die Schirm-Verlustfaktoren und (bei Ergänzung durch die Skin- und Proximityeffekt-Verlustfaktoren nach [3]) auch die Leiterverlustfaktoren bestimmt werden. Insbesondere ergeben sich Leiterstrom-Aufteilungsfaktoren, die das Verhältnis des jeweiligen Leiterstromes zu dem ihm zuzuordnenden Phasenstrom nach Betrag und Phase festlegen.

Die weitere Berechnung der thermischen Verhältnisse bei Berücksichtigung dieser Stromaufteilungsfaktoren für partielle Bodenaustrocknung und zyklische Last [4; 5] ist in [1; 6] dargelegt. In diese Berechnung gehen alle Leitertemperaturen (die ja die Verluste beeinflussen) sowie die zulässigen Phasenströme als Unbekannte ein; vorausgesetzt wird nur, dass irgendeine der Kabeladern ihre höchstzulässige Leitertemperatur erreichen soll. Daraus folgt ein iterativer Rechenprozess, der die Temperaturverteilung, die Verluste sowie die Trassendurchgangsleistung liefert.

Über Ergebnisse der mit dieser Methode vorgenommenen Untersuchungen soll im folgenden berichtet werden.

Figur 1
Verbindung zweier Netzbereiche durch drei Einleiterkabel-Systeme bzw. neun Kabeladern
Phasenschaltung L1-L2-L3--L3-L2-L1--L1-L2-L3



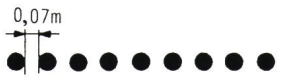
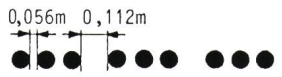
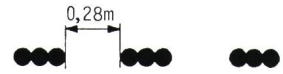
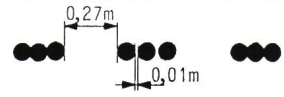
Verlegeanordnung Kabelader Nr. 1....9	Phasenschaltung Kabelader Nr. 1....9	Belastbarkeit A
a 	* I L1-L2-L3--L1-L2-L3--L1-L2-L3	1739
	II L1-L2-L3--L3-L2-L1--L1-L2-L3	1642
	III L1-L1-L1--L2-L2-L2--L3-L3-L3	1111
	** L1-L3-L2--L2-L3-L1--L2-L1-L3	1628
b 	* I L1-L2-L3--L1-L2-L3--L1-L2-L3	1760
	II L1-L2-L3--L3-L2-L1--L1-L2-L3	1697
	III L1-L1-L1--L2-L2-L2--L3-L3-L3	1060
	* L1-L3-L2--L1-L2-L3--L1 L2 L3	1768
	** L1 L2 L3--L2 L1 L3--L3 L2 L1	1677
c 	* I L1-L2-L3--L1-L2-L3--L1-L2-L3	1812
	II L1-L2-L3--L3-L2-L1--L1-L2-L3	1807
	III L1-L1-L1--L2-L2-L2--L3-L3-L3	839
	** L1-L2-L3--L2-L1-L3--L3-L2-L1	1705
d 	* I L1-L2-L3--L1-L2-L3--L1-L2-L3	1839
	II L1-L2-L3--L3-L2-L1--L1-L2-L3	1831
	III L1-L1-L1--L2-L2-L2--L3-L3-L3	846

Tabelle I Zusammenfassung einiger Ergebnisse für drei parallele Kabelsysteme in Einebenenanordnung
Kabeltyp: N2XSY 6/10 kV, 1 · 500 rm/35
Belastungsgrad 0,7; Boden-Standardgrössen nach [4]
* Phasenschaltung mit höchster Systembelastbarkeit
** systembeschränkte Phasenschaltung mit niedrigster Systembelastbarkeit

2. Einfluss der Phasenschaltung bei Standard-Flachverlegung

Aufgrund der vielfältigen, mit der Systemanzahl rasch ansteigenden Schaltungsmöglichkeiten [2] wurde die Optimierung zunächst auf drei parallele Kabelsysteme beschränkt. Aus den hierbei erzielten Ergebnissen lassen sich jedoch einige allgemeingültige Aussagen zur Parallelschaltung von Einleiterkabeln treffen.

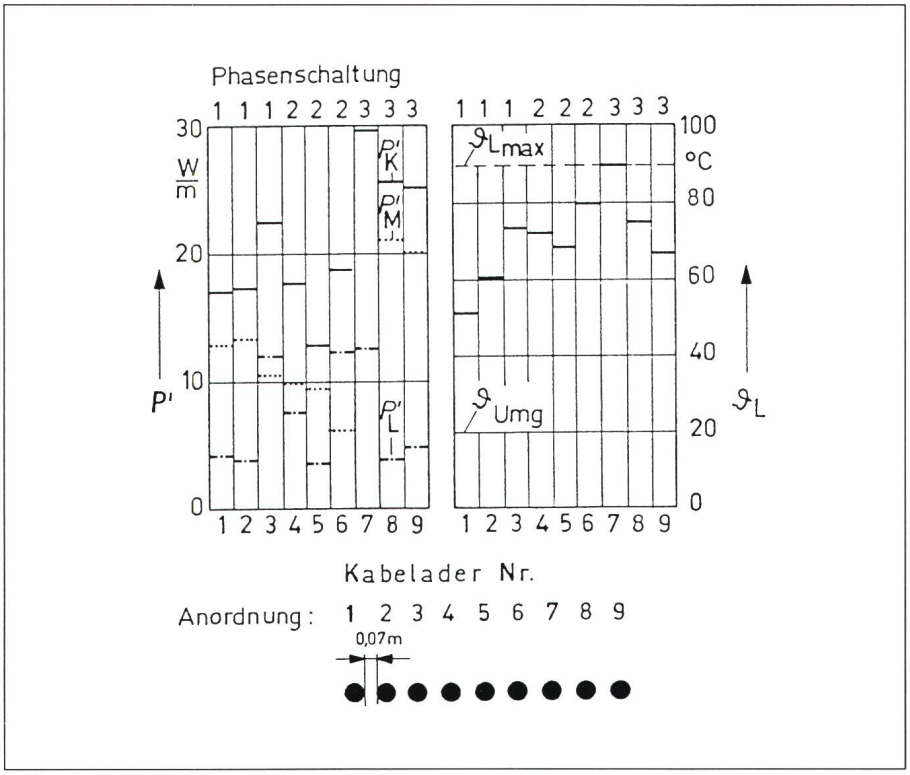
Untersucht werden in den folgenden Beispielen 10-kV-VPE-Einleiterkabel mit einem Kupferleiterquerschnitt von 500 mm², und zwar in einer Anordnung nach Tabelle Ia (7 cm Lücke zwischen den Kabeln), die auch den Tabellenwerten in der VDE-Bestimmung 0298 [4] zugrundeliegt.

Das erste Untersuchungsergebnis, das auch auf alle anderen untersuchten Anordnungen zutrifft, ist folgendes: Werden die drei Phasen jeweils drei benachbarten Kabeladern (systembeschränkt) zugeordnet, so ergeben sich weit höhere Belastbarkeiten als für die nicht systembeschränkten Schaltungskombinationen.

Unter den in Tabelle I aufgeführten Kombinationen stellt Phasenschaltung III die bautechnisch günstigste dar, da bei ihr nicht, wie bei allen anderen Schaltungen, die Leiter einer Phase an den Sammelschienen über Kreuz zusammengeführt werden müssen. Schaltung II hingegen ist die zur Erzielung möglichst gleichmässiger Leiterstromaufteilungen oft empfohlene Phasenfolge [7].

Figur 2 zeigt für die Phasenschaltung III die Aufteilung der Leiterverluste, der Schirmverluste und der Gesamtverluste je Kabelader sowie deren Leitertemperaturen. Deutlich wird, dass sich bei dieser Phasenfolge eine stark schwankende Leiterverlustverteilung und extrem hohe Schirmverluste ergeben, wodurch die Belastbarkeit der Parallelschaltung auf nur 1111 A gedrückt wird (Belastbarkeit eines allein verlegten Systems: 743 A).

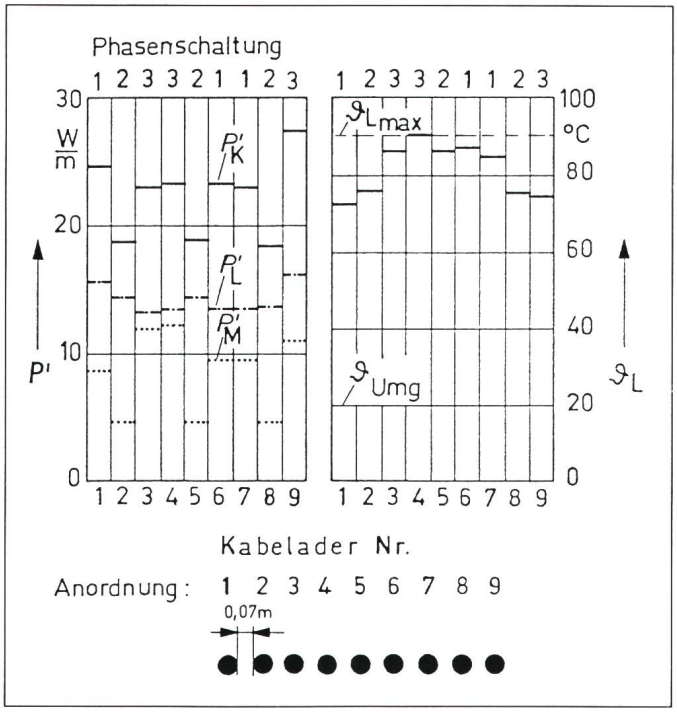
Die entsprechenden Ergebnisse für die Phasenschaltungen II und I sind in den Figuren 3 und 4 wiedergegeben.



Figur 2 Verlustleistungsbeläge und Leitertemperaturen der Kabeladern bei der Phasenschaltung III

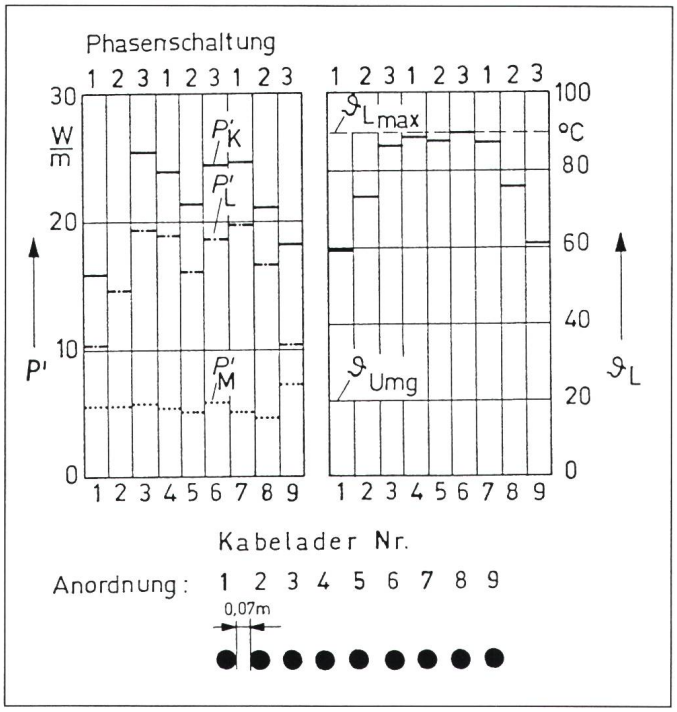
Belastbarkeit: 1111 A

——— Gesamtverluste P'_K
– · – Leiterverluste P'_L
..... Schirmverluste P'_M
ϑ_L Leitertemperatur
ϑ_{Umg} Umgebungstemperatur



Figur 3 Verlustleistungsbeläge und Leitertemperaturen der Kabeladern bei der Phasenschaltung II

Belastbarkeit: 1642 A



Figur 4 Verlustleistungsbeläge und Leitertemperaturen der Kabeladern bei der Phasenschaltung I

Belastbarkeit: 1739 A

Beim Vergleich dieser Figuren wird zunächst einmal deutlich, dass die Aufteilung der Leiterströme und -verluste tatsächlich bei Schaltung II günstiger als bei I ist; bei einer Unterdrükkung der Schirmströme erreicht diese daher hohe Belastbarkeiten. Man erkennt aber auch, dass sich für Phasenschaltung I weitaus geringere und zudem sehr gleichmässig verteilte Schirmströme ergeben. Resultat ist, dass Phasenschaltung I eine um rund 6% höhere Belastbarkeit aufweist (1739 A) als die üblicherweise empfohlene Phasenschaltung II mit 1642 A; zudem liegen die Gesamtverluste von Phasenschaltung I auch bei diesem höheren Phasenstrom um rund 5% niedriger als bei Phasenschaltung II. Gegenüber Phasenschaltung III erlaubt Schaltung I eine Belastbarkeitssteigerung um rund 57%.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die in VDE-Bestimmung 0298 [4] für die entsprechende Häufungsanordnung (aber für andere Voraussetzungen!) angegebene Belastbarkeit für den Parallelbetrieb nicht einfach übernommen werden darf: Für das gewählte Beispiel liefert [4] 3×743 A×0,77=1716 A, eine Belastbarkeit, die für die empfohlene Phasenfolge II (1642 A) nicht mehr auf der sicheren Seite liegt.

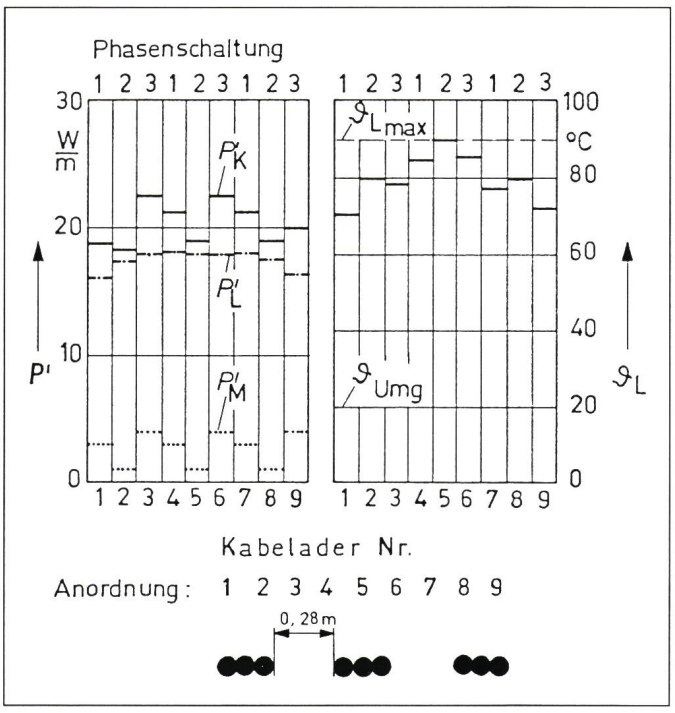
3. Variationen der Einebenen-Verlegung

In Tabelle Ib bis Id sind Varianten zur Einebenenanordnung bei gegenüber Tabelle Ia gleichbleibender Trassenbreite dargestellt. Tabelle Ib erfasst hierbei die Empfehlung nach [7], den Systemabstand doppelt so gross zu wählen wie den Abstand zwischen den Adern eines Systems. Tatsächlich können mit dieser Massnahme die Schirmverluste bei Phasenschaltung II um rund 10% verringert werden, so dass die Belastbarkeit – trotz der thermisch ungünstigeren Verhältnisse – auf 1697 A ansteigt, wobei die Gesamtverluste mit 207 W/m etwa gleich bleiben. Für Phasenschaltung I steigt die Belastbarkeit auf 1768 A, der Verlustbelag liegt hier bei 201 W/m. Phasenschaltung III wird bei dieser Verlegeanordnung aufgrund der stärkeren thermischen Kopplung noch ungünstiger mit einer Belastbarkeit von 1060 A.

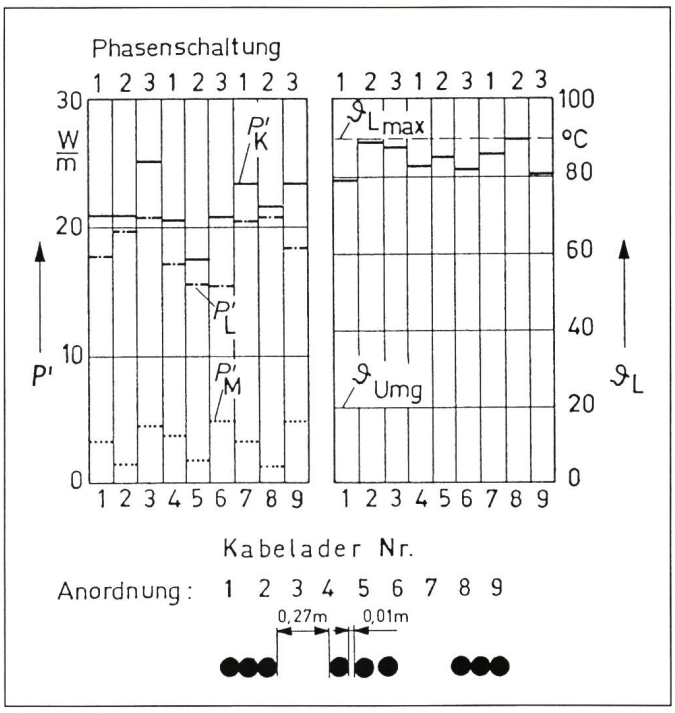
Dem Trend folgend, durch Vergrösserung der Systemabstände und Verringerung der Aderabstände innerhalb der Systeme den Anteil der Schirmverluste an den Gesamtverlusten zu verringern, wurde die Verlegeanordnung nach Tabelle Ic untersucht: Bei gleichbleibender Trassenbreite ist hier der grösstmögliche Systemabstand gewählt, und die Kabeladern innerhalb der Systeme liegen dicht nebeneinander. Figur 5 zeigt die für Phasenschaltung I relevanten Verteilungen, die sich im übrigen kaum noch von denjenigen der Phasenschaltung II unterscheiden. Deutlich wird die gute thermische Auslastung des Gesamtsystems: Bei sieben von neun Kabeladern liegt die Leitertemperatur nahe bei 80° C. Die Belastbarkeiten der Phasenschaltungen liegen jetzt bei 1812 A (Schaltung I) bzw. 1807 A (Schaltung II) und die Gesamtverlustbeläge bei 184 W/m bzw. 185 W/m.

Die optimale Anordnung, die aber aufgrund des hohen verlegetechnischen Aufwandes wohl nur von theoretischem Interesse ist, zeigt Tabelle Id: Hier liegen die Adern des mittleren Systems mit einer Lücke von jeweils 1 cm. Folge hiervon ist eine Vergrösserung der Koppelinduktivitäten dieses Systems, so dass die beiden äusseren Systeme noch besser ausgelastet werden, wie dies in Figur 6 anhand der Leitertemperaturen und der Verlustverteilungen im Vergleich zu Figur 5 deutlich wird. Die Belastbarkeiten der Phasenschaltungen I und II steigen auf 1839 A bzw. 1831 A bei Gesamtverlusten von rund 195 W/m.

Während bei parallel betriebenen Einleiterkabeln mit unterdrückten



Figur 5 Verlustleistungsbeläge und Leitertemperaturen der Kabeladern bei der Phasenschaltung I
Belastbarkeit: 1812 A



Figur 6 Verlustleistungsbeläge und Leitertemperaturen der Kabeladern bei der Phasenschaltung I
Belastbarkeit: 1839 A

Schirmströmen durch entsprechende Phasenfolgewahl eine optimale Anpassung der Leiterströme (bzw. -verluste) an die thermischen Verhältnisse anzustreben ist [1], spielt für Kabel mit beidseitig geerdeten Schirmen die Minimierung der Schirmverluste die entscheidende Rolle. Hieraus folgt:

a) Es empfiehlt sich eine systemweise beschränkte Phasenfolge.

b) Mit der Phasenschaltung I (L1-L2-L3--L1-L2-L3--L1-L2-L3) lassen sich aufgrund der geringeren Schirmverluste durchweg höhere Belastbarkeiten und geringere Verluste erzielen als mit Phasenfolge II (L1-L2-L3--L3-L2-L1--L1-L2-L3). Die Unterschiede vergrössern sich zugunsten der Phasenschaltung I, wenn die Kabeladern jedes Systems mit einer Lükke verlegt werden.

c) Mit einer günstigen Verlegeanordnung (systemweise dichte Verlegung nach Tabelle Ic kann die Belastbarkeit gegenüber dem normalen Vorgehen (Verlegung nach Tabelle Ia bei Phasenfolge II) um rund 12% angehoben werden bei um rund 6% verringerten Verlusten.

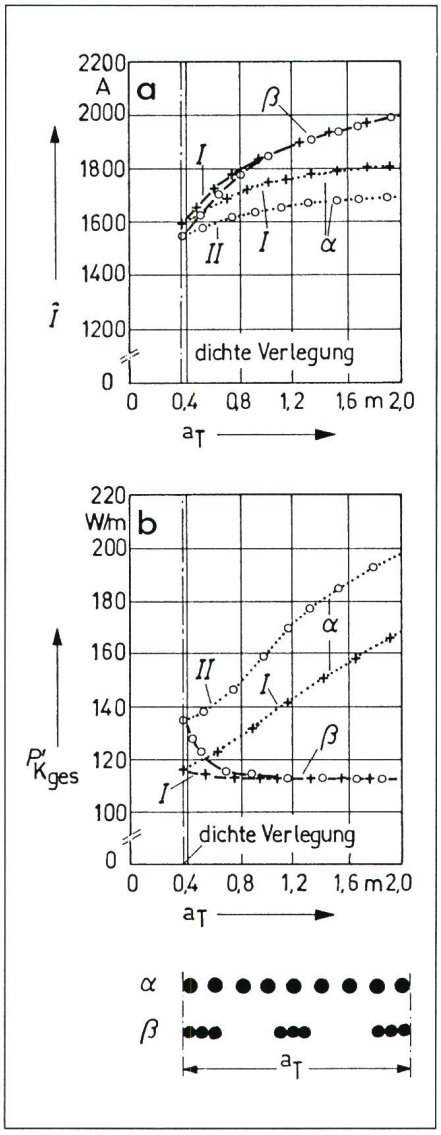
4. Einfluss der Trassenbreite

Der Fragestellung, inwieweit durch eine Verbreiterung der Kabeltrasse Belastbarkeitssteigerungen erzielbar sind, sollen die beiden Verlegearten nach Tabelle Ia und Ic sowie die Phasenschaltungen I und II zugrundegelegt werden. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Figur 7 dargestellt.

Figur 7 ist für die Verlegeart nach Tabelle Ia (α) zu entnehmen, dass mit wachsender Trassenbreite zwar die thermischen Kopplungen der Kabeladern geringer werden, durch die zunehmenden Schirmströme jedoch die Belastbarkeiten nur relativ schwach ansteigen. Bei der Verlegeart nach Tabelle Ic (β) hingegen vergrössern sich die Schirmverluste nur geringfügig (für Phasenschaltung I nur von 13,2% auf 13,8% bei Verbreiterung der Trasse von 1 m auf 2 m) und streben gegen die für ein einzeln verlegtes Kabelsystem gegebenen Verluste. Aufgrund der geringer werdenden thermischen Kopplungen steigen die Belastbarkeiten mit breiterer Kabeltrasse spürbar an.

Wird für die in Figur 7a betrachteten Systeme die Übertragungsleistung vorgegeben, so ergeben sich Gesamtverlustbeläge, wie sie für einen Phasenstrom von 1500 A in Figur 7b dargestellt sind. Deutlich wird die Möglichkeit, aufgrund geeigneter Verlegeanordnungen Übertragungsverluste zu vermindern: So liegt für Phasenschaltung I der Verlustleistungsbelag bei Verlegeanordnung nach Tabelle Ic für eine Trassenbreite von 1 m um rund 20% und von 2 m um rund 48% niedriger als für die Verlegeanordnung nach Tabelle Ia. Für Phasenfolge II sind die Einsparungen noch grösser: 40% bei einer Trassenbreite von 1 m und 75% bei einer Trassenbreite von 2 m.

Es bleibt somit festzuhalten, dass sowohl unter dem Aspekt der Belastbarkeitssteigerung als auch der Verlustminimierung die zur Verfügung stehende Trassenbreite in den Abstand zwischen den einzelnen Kabelsystemen (und nicht in eine gleichmässige Aufteilung auf die Aderabstände) investiert werden sollte.



Figur 7 Belastbarkeit (a) und zugeordnete Verlustleistungsbeläge (b) dreier paralleler Einleiterkabelsysteme in Einebenenanordnung α und β als Funktion der Trassenbreite a_T

Kabeltyp: N2XSY 6/10 kV, 1 · 500 rm/35

P'_{Kges} Gesamtverlustbelag bei I_P = 1500 A

5. Gebündelte Verlegung

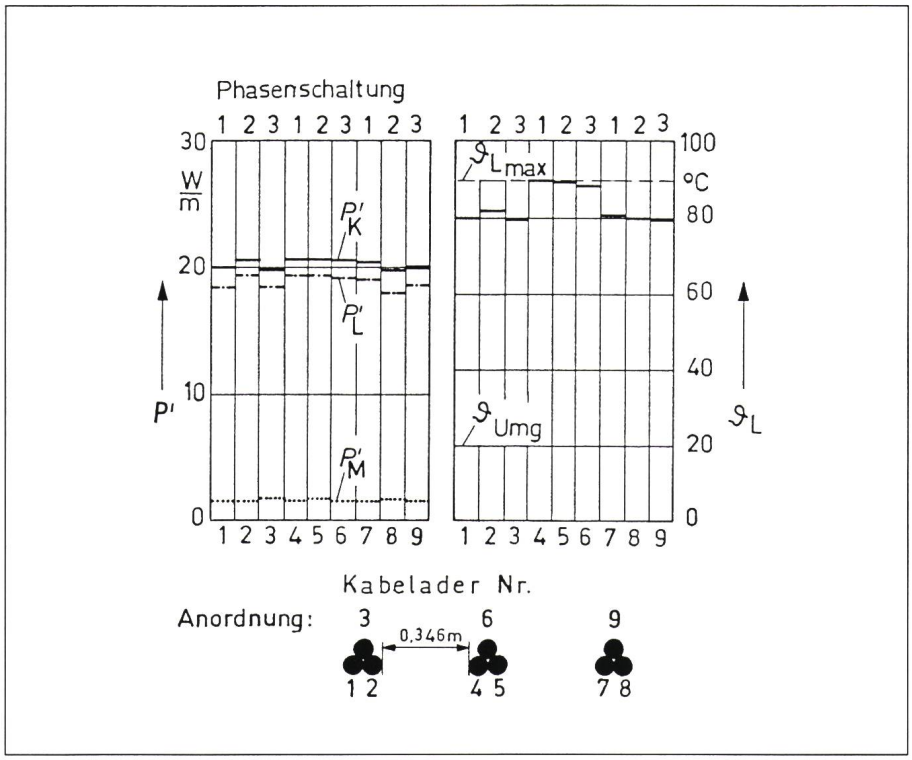
Da die Konsequenz der Ergebnisse aus Abschnitt 3 eine enge Verlegung der Adern eines Systems bei möglichst grossem Systemabstand ist, soll im vorliegenden Abschnitt nach der Belastbarkeit gebündelt verlegter, parallel betriebener Kabel nach Figur 8 gefragt werden.

Bei einer solchen Anordnung sind die Induktivitätsbeläge aller Kabeladern einander nahezu gleich, so dass die Phasenzuordnung nur von untergeordneter Bedeutung ist (maximaler Unterschied etwa 0,4%). Es ergibt sich für die Anordnung nach Figur 8 eine Belastbarkeit von 1870 A, die mithin um etwa 3% höher liegt als bei systemweise dichter Flachverlegung. Der Figur 8 sind die gleichmässige Aufteilung der Verluste auf die Kabeladern und die innerhalb jedes Systems nahezu gleichen Leitertemperaturen zu entnehmen.

Somit ergibt sich als Folgerung, dass immer dort, wo keine Flachverlegung gefordert ist, eine gebündelte Verlegung der parallel betriebenen Kabel die grössten Belastbarkeiten liefert. Verlegetechnisch vorteilhaft ist die Verlegung bereits vorverseilter Drehstromsysteme; hierbei ist allerdings auf hinreichend grosse Schlaglängen zu achten, da mit dem Verseileingang der Kabeladern auch der Verlustleistungsbelag jedes Systems gegenüber unverseilten Systemen anwächst.

6. Parallelschaltung von Kabeln unterschiedlicher Leiterquerschnitte

Es wurde auch der Frage nachgegangen, ob es von Vorteil sein kann, Kabelsysteme mit unterschiedlichen Leiterquerschnitten parallel zu schalten. Einige grundsätzliche Ergebnisse der durchgeführten, umfangreichen Untersuchungen zeigt Tabelle II für die Parallelschaltung zweier 10-kV-VPE-Kabelsysteme mit Kupferleiterquerschnitten von 500 mm² mit einem 10-kV-VPE-Kabelsystem mit Kupferleitern von 240 mm².



Figur 8 Verlustleistungsbeläge und Leitertemperaturen der gebündelt verlegten Kabeladern bei dem höchstzulässigen Transportstrom von 1870 A

Kabeltyp: N2XSY 6/10 kV, 1 · 500 rm/35

Prinzipiell erhält man ähnliche Aussagen zur Auswahl günstiger Phasenfolgen wie zu den vorangegangenen Beispielen. Die höchste Belastbarkeit wird erzielt bei der verlegetechnisch aufwendigen Variante, das Kabelsystem mit dem geringeren Leiterquerschnitt in die Mitte, und zwar mit 2 cm Lücke zwischen den Kabeladern, und die beiden anderen Systeme in dichter Anordnung so weit wie möglich nach aussen zu legen (Variante IIe). Ansonsten empfiehlt es sich auch hier, die zur Verfügung stehende Trassenbreite in den Abstand zwischen den Systemen zu investieren. Bei systemweise dichter Aderverlegung erzielt die Variante IIa, bei der das System mit geringerem Leiterquerschnitt aussen liegt, eine um 3% höhere Belastbarkeit als Variante IIb mit der Anordnung dieses Systems in der Trassenmitte.

Zu der Frage, ob durch die Parallelschaltung von im Leiterquerschnitt unterschiedlichen Kabelsystemen Belastbarkeiten erzielbar sind, die – bezogen auf den insgesamt eingesetzten Leiterquerschnitt – höher sind als bei Einsatz gleichartiger Systeme, geben die Varianten f bis k in Tabelle II Auskunft. Verglichen wird die Parallelschaltung von 10-kV-VPE-Einleiterkabeln, und zwar

- von drei Systemen mit einem Kupferleiterquerschnitt von 240 mm² (IIf)
- von zwei Systemen mit 300 mm² und einem System mit 120 mm² (IIg, IIh) sowie
- von zwei Systemen mit 240 mm² und zwei Systemen mit 120 mm² Kupferleiterquerschnitt (IIi, IIk)

Deutlich wird, dass nur dann eine (geringfügige) Einsparung an Gesamtleiterquerschnitt gegeben ist, wenn anstelle von drei Systemen vier Systeme parallel betrieben werden. Der Einsatz von Systemen unterschiedlicher Leiterquerschnitte erscheint nach diesen Ergebnissen nicht sinnvoll.

7. Beeinflussung durch benachbarte Wärmequellen

Liegen in der Kabeltrasse den parallel betriebenen Kabeln andere Wärmequellen parallel, beispielsweise andere Kabel oder auch Fernheizrohre, so sind Verlegeanordnung und Phasenschaltung auf die durch diese Fremdwärmequellen gegebene thermische Vorbelastung der Trasse (Fig. 9) abzustimmen.

Einige Ergebnisse sind in Figur 10 für das Beispiel zweier Fremdwärmequellen mit Verlustleistungsbelägen von je 60 W/m zusammengestellt. Deutlich wird, dass bei dem vorliegenden Temperaturprofil der Vorteil einer systemweise dichten Verlegung der Kabeladern gegenüber einer Verlegung mit gleichbleibender Lücke verlorengeht. Für die Beispiele der Figur 10 ergibt sich als optimale Phasenfolge: L3-L2-L1--L3-L2-L1--L3-L2-L1 (Belastbarkeit 1326 A), und die meist empfohlene Phasenfolge II (Belastbarkeit 1155 A) erweist sich als sehr ungünstig. Die sich ergebende Verteilung der Leitertemperaturen zeigt deutlich, dass bei dieser Anordnung die von den Fremdwärmequellen entfernter liegenden Kabeladern thermisch nicht voll ausgelastet sind.

Durch eine den thermischen Verhältnissen besser angepasste Verlegeanordnung lassen sich jedoch (bei gleichbleibender Trassenbreite) erheblich grössere Belastbarkeiten der Parallelschaltung erreichen. Dies ist in der Figur 10 für eine systemweise dichte Verlegung der Kabeladern bei gestuften Abständen zwischen den Kabelsystemen sowie einem grossen Abstand zwischen den Fremdwärmequellen und dem diesen benachbarten Kabelsystem gezeigt; die optimale Phasenfolge ist wie oben, und die Belastbarkeit beträgt 1493 A. Figur 10 macht deutlich, dass durch die gewählte Verlegeanordnung eine weitgehende thermische Ausnutzung aller Kabeladern erreicht wird.

Aus diesen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass bei Anwesenheit von zusätzlichen Wärmequellen im Kabelgraben die günstigste Anordnung und die optimale Phasenfolge der parallelbetriebenen Einleiterkabel sowohl von der Lage der Fremdwärmequellen als auch von deren Verlustleistungsbelägen abhängen. Optimierungsaspekte können daher nicht generalisiert werden, sondern bleiben fallweisen Untersuchungen vorbehalten.

8. Belastbarkeitsreserve im Fehlerfall

Normalerweise wird beim Ausfall einer Kabelader das entsprechende Kabelsystem abgeschaltet; bei einer Parallelschaltung mehrerer Kabelsy-

steme kann jedoch eine weit höhere Belastbarkeit erhalten werden, wenn nur die fehlerhafte Kabelader abgeschaltet wird. Die verbleibende Belastbarkeit hängt allerdings entscheidend von der gewählten Phasenfolge ab.

Dies soll anhand der Figur 11 für die Verlegeanordnung nach Tabelle Ia (Belastbarkeit bei Phasenfolge I: 1739 A) verdeutlicht werden. In dieser Figur ist über der jeweils ausgefallenen Kabelader die verbleibende Belastbarkeit dargestellt, und zwar

a) für eine dem Fehlerfall optimal angepasste Phasenfolge (durchgezogene Linien). Die Erzielung dieser Belastbarkeiten erfordert gegebenenfalls nach Eintreten des Fehlers ein Umschalten der Kabeladern auf andere Phasen, was wegen des grossen Aufwandes in der Praxis wohl nur in Ausnahmefällen von Interesse sein wird.

b) für die Phasenfolge I

c) für die Phasenfolge II

d) für das vollständig abgeschaltete System der ausgefallenen Kabelader.

Es wird deutlich, dass eine Fortführung des Betriebs mit den verbleibenden acht Kabeladern wesentlich höhere Belastbarkeiten ermöglicht als nach Abschalten eines kompletten Kabelsystems. Ausserdem erweist sich auch hier die Phasenfolge I der Phasenfolge II als überlegen, und zwar sowohl bei Abschalten des gesamten fehlerbehafteten Systems als auch, im anderen Falle, für die ungünstigstenfalls eintretenden Fehler.

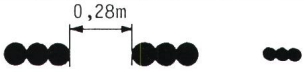
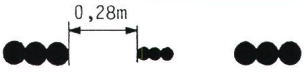
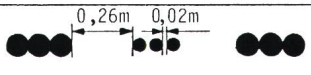
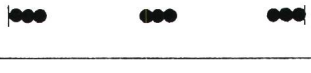
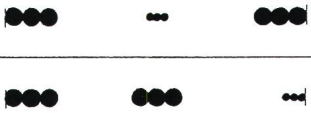
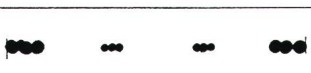
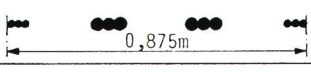
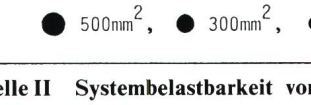
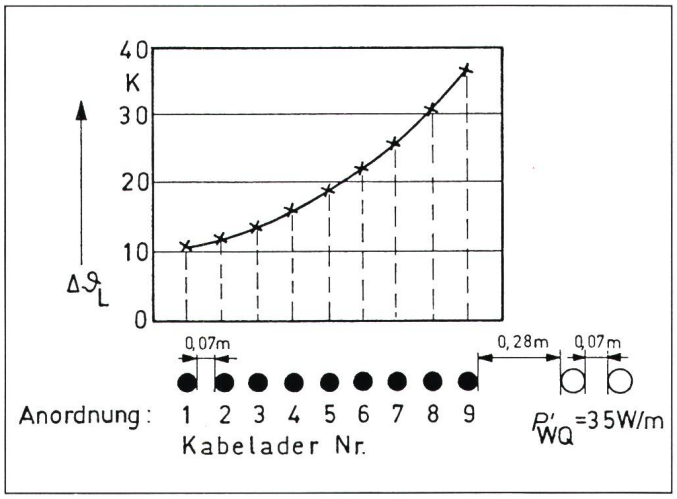
Verlegeranordnung	Phasenschaltung	Belastbarkeit A
a 	* I L1-L2-L3--L1-L2-L3--L1-L2-L3	1648
	II L1-L2-L3--L3-L2-L1--L1-L2-L3	1643
	** L1-L2-L3--L2-L1-L3--L3-L2-L1	1494
b 	I L1-L2-L3--L1-L2-L3--L1-L2-L3	1600
	* II L1-L2-L3--L3-L2-L1--L1-L2-L3	1602
	** L1-L2-L3--L2-L1-L3--L3-L2-L1	1528
c	* L1-L3-L2--L1-L3-L2--L3-L1-L2	1582
	I L1-L2-L3--L1-L2-L3--L1-L2-L3	1560
	II L1-L2-L3--L3-L2-L1--L1-L2-L3	1521
	** L1-L3-L2--L2-L3-L1--L2-L1-L3	1416
d	* L1-L3-L2--L1-L3-L2--L3-L1-L2	1521
	I L1-L2-L3--L1-L2-L3--L1-L2-L3	1516
	II L1-L2-L3--L3-L2-L1--L1-L2-L3	1501
	** L1-L2-L3--L2-L3-L1--L3-L2-L1	1443
e 	* I L1-L2-L3--L1-L2-L3--L1-L2-L3	1688
f 	* I L1-L2-L3--L1-L2-L3--L1-L2-L3	1312
g 	* II L1-L2-L3--L3-L2-L1--L1-L2-L3	1300
h 	* L1-L3-L2--L1-L3-L2--L3-L2-L1	1269
i 	* I L1-L2-L3--L1-L2-L3--L1-L2-L3	1365
k 	* I L1-L2-L3--L1-L2-L3--L1-L2-L3	1329
● 500mm², ● 300mm², ● 240mm², • 120mm² Leiterquerschnitt		

Tabelle II Systembelastbarkeit von Parallelschaltungen unterschiedlicher Einleiterkabel vom Typ N2XSY 6/10 kV

Bei (f) bis (k) bleibt die Gesamtsumme der eingesetzten Leiterquerschnitte gleich.

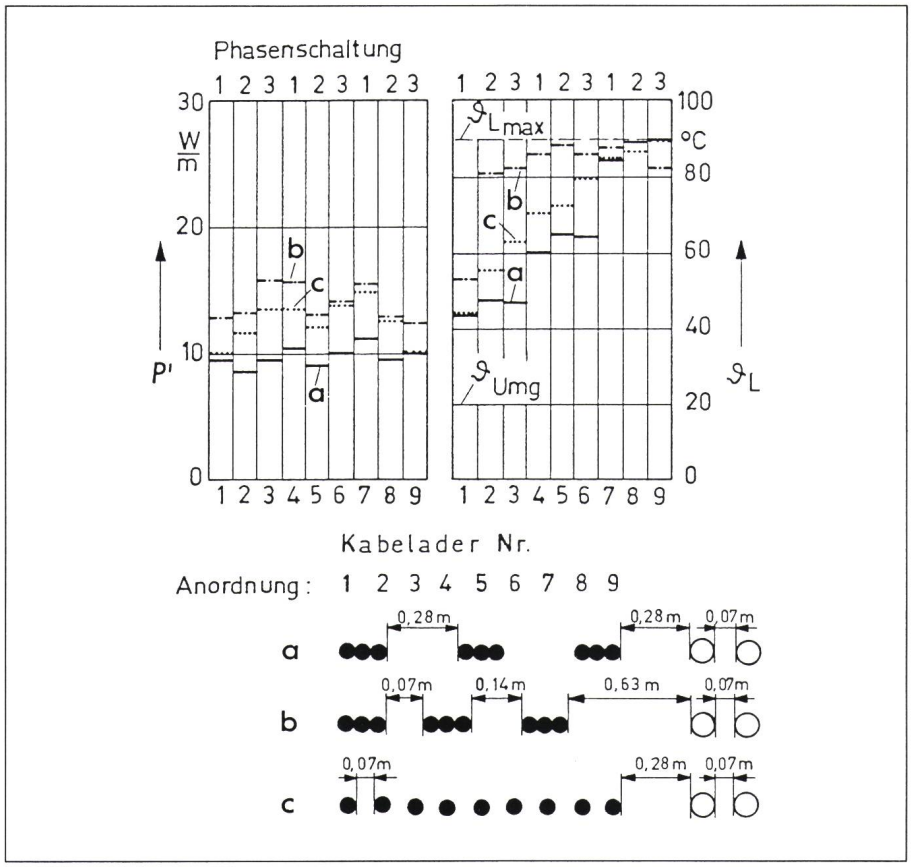
9. Folgerungen

Die dargelegten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass bei Parallelschaltung mehrerer Einleiterkabelsysteme Optimierungen sowohl hinsichtlich der Verlegeanordnung als auch im Hinblick auf die Phasenschaltung vorgenommen werden können, die in erheblichem Masse die resultierende Belastbarkeit und auch die Gesamtverluste beeinflussen. Das Ergebnis solcher Optimierungen hängt von den thermischen Verhältnissen in der Trasse ab, so dass gegebenenfalls auch Fremdwärmequellen zu berücksichtigen sind. Bei ebener Verlegung paralleler Einleiterkabel dürfen die in VDE-Bestimmung 0298 T2 [4] (unter anderen Voraussetzungen) angegebenen Belastbarkeiten nicht ungeprüft übernommen werden, da hierbei erhebliche Überlastungen einzelner Kabeladern auftreten können.



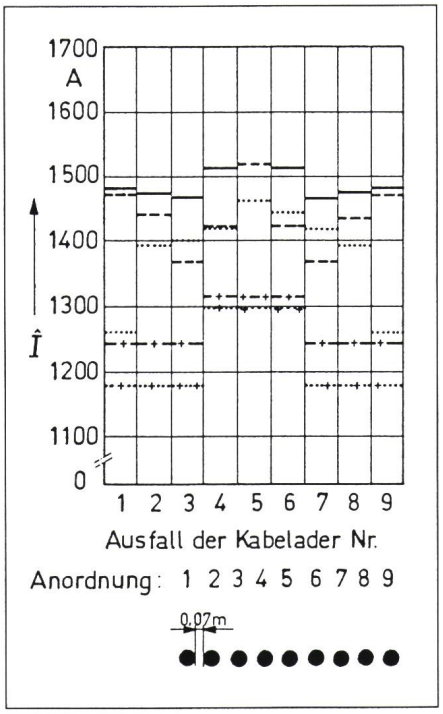
Figur 9 Erwärmung des Übertragungssystems durch zwei benachbarte Wärmequellen

P_{WQ}' Verlustleistungsbelag je Wärmequelle



Figur 10 Verlustleistungsbeläge und Leitertemperaturen der Kabeladern bei Phasenschaltung I und Beeinflussung durch Fremdwärmequellen

P'_{WQ} = 60 W/m
Kabeltyp: N2XSY 6/10 kV, 1 · 500 rm/35
Verlegeanordnung a; Systembelastbarkeit: 1288 A
Verlegeanordnung b; Systembelastbarkeit: 1493 A
Verlegeanordnung c; Systembelastbarkeit: 1326 A



Figur 11 Residuale Systembelastbarkeit nach Ausfall einer Kabelader

Kabeltyp: N2XSY 6/10 kV, 1 · 500 rm/35
Parameter: ——— Beste Phasenschaltung bei Ausfall der Kabelader
Nr. 1: O-L3-L2--L1-L2-L3--L2-L1-L3
Nr. 2: L1-O-L3--L2-L1-L3--L1-L2-L3
Nr. 3: L1-L2-O--L3-L1-L2--L1-L3-L2
Nr. 4: L1-L3-L2--O-L1-L2--L1-L3-L2
Nr. 5: L1-L2-L3--L1-O-L3--L1-L2-L3
Nr. 6...9 symmetrisch zu Nr. 4...1

- - - Phasenschaltung I
..... Phasenschaltung II
+ + + Belastbarkeit nach Abschalten des gesamten Einleiterkabelsystems der fehlerhaften Kabelader (Phasenschaltungen I und II)

Literatur

[1] *H. Brakelmann:* Belastbarkeiten gehäuft verlegter Mittelspannungskabel. Elektrizitätswirtschaft 86(1987)2, S. 54 . . . 58.

[2] *W. Rüger:* Einleiterkabel mit hohen Betriebs- und höchsten Kurzschlussströmen. Diss. Univ. Erlangen, 1988.

[3] Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent (facteur de charge 100%). Deuxième édition. Publication de la CEI 287, 1982.

[4] Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen. Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln mit Nennspannungen U_0/U bis 18/30 kV. (VDE-Bestimmung) DIN 57298 Teil 2/VDE 0298 Teil 2/11.79.

[5] *F. Winkler:* Strombelastbarkeit von Starkstromkabeln in Erde bei Berücksichtigung der Bodenaustrocknung und eines Tageslastspieles. ETZ-Report 13, 1978.

[6] *H. Brakelmann:* Belastbarkeiten der Energiekabel. Berechnungsmethoden und Parameteranalysen. Berlin/Offenbach, VDE-Verlag, 1985.

[7] *L. Heinold:* Kabel und Leitungen für Starkstrom. Neuauflage. Berlin/München, Siemens AG, 1987.