Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 11

Artikel: Streckenweise Reduktionsoptimierung bei Fremdfeldbeeinflussungen

Autor: Mazan, H. / Burckhardt, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915558

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: 12.12.2025

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

Streckenweise Reduktionsoptimierung bei Fremdfeldbeeinflussungen

Von *H. Mazan* und *H. Burckhardt*

537.228:621.315.2:621.391.31

1. Einleitung

Fernmeldekabel, welche in der Nähe von Starkstromleitungen wie z. B. Hochspannungsleitungen oder Bahnlinien verlaufen (in der Schweiz praktisch überall!), unterliegen bekanntlich einer elektromagnetischen Fremdfeldbeeinflussung. Die Grösse der so induzierten Längsspannung hängt ab von Betrag und Frequenz des beeinflussenden Stromes, von Abstand und Länge der Leitungen sowie von der Bodenleitfähigkeit am Beeinflussungsort. Zu den Leitungen parallel verlaufende Metallteile können naturgemäss die Längsspannung bis zu einem gewissen Grad verkleinern, wenn sie an beiden Enden leitend mit dem Erdreich verbunden sind.

Im allgemeinen Fall erreicht die Längsspannung Werte, die als gefährlich bezeichnet werden, falls nicht besondere Gegenmassnahmen getroffen sind. Als maximal tolerierbare Höchstwerte bei Fernmeldeanlagen gelten 60 V für länger andauernde bzw. 430 V für kurze Beeinflussungen; auf diese Werte sind auch die an den Leitungen angeschlossenen Apparate ausgelegt. Auf der Seite des beeinflussten Systems sind die gebräuchlichsten Massnahmen zur Herabsetzung der Längsspannung (abgesehen von einer zweckmässigen baulichen Planung zur Vermeidung von Näherungen) galvanische Trennung mit Isoliertransformatoren, Spannungsbegrenzung mittels Ableitelementen (Halbleiter oder Gasentladungsstrecken) sowie Abschirmung der Leitung. Während bei der ersten Massnahme die Möglichkeit der Gleichstromsignalübertragung preisgegeben und bei der zweiten die Übertragung während der Dauer der Fremdfeldbeeinflussung gestört wird, muss durch die Abschirmung ein beträchtlicher Kostenaufwand in Kauf genommen werden.

Im folgenden soll eine Methode gezeigt werden, die erlaubt, die Kosten für die Abschirmung unter der Bedingung minimal zu halten, dass die Längsspannung einen vorgegebenen Grenzwert nicht übersteigt und dadurch der sichere Betrieb der Anlage unter allen Umständen aufrechterhalten wird.

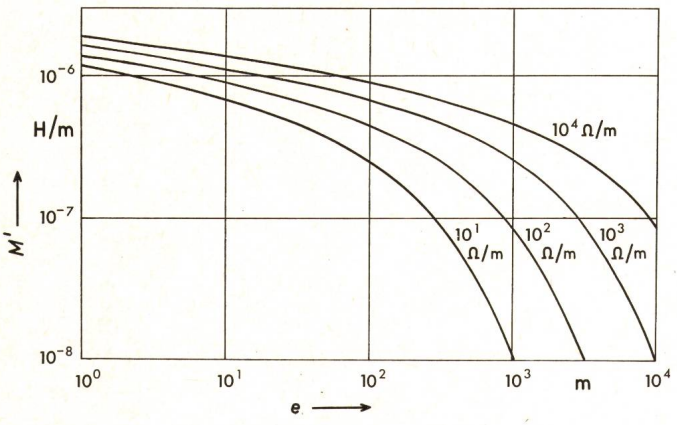

Fig. 1
Gegeninduktivitätsbelag in Funktion des seitlichen Abstandes bei 50 Hz für verschiedene spezifische Bodenleitfähigkeiten

2. Berechnung von Gegeninduktivität und Spannungsbelag

(Fig. 1)

Die induzierte Längsspannung U einer Strecke mit der Länge l bei stationären Wechselströmen berechnet sich zu

$$U = 2\pi f I \int_0^1 M'(x)\,\mathrm{d}x$$

wobei f die Frequenz, I der Effektivwert des Stromes der beeinflussenden Leitung und $M'(x)$ der örtlich veränderliche Gegeninduktivitätsbelag bedeuten. Ist diese Änderung nicht zu gross, so kann die Strecke in m Abschnitte eingeteilt werden, deren Längen l_j so gewählt werden, dass ohne zu grosse Einbusse an Genauigkeit anstelle des ortsabhängigen ein mittlerer Spannungsbelag $\overline{M}_j'$ gesetzt werden kann. Dadurch wird die Längsspannung

$$U = 2\pi f I \sum_{j=1}^{m} \overline{M}_j' \cdot l_j$$

während der mittlere Spannungsbelag $\overline{U}_j'$ im Abschnitt j zu

$$\overline{U}_j' = 2\pi f I \overline{M}_j'$$

bestimmt wird.

Die Gegeninduktivität ist im wesentlichen abhängig vom seitlichen Abstand zwischen dem beeinflussenden und beeinflussten Leiter sowie von der Bodenleitfähigkeit, welche ihrerseits wiederum in Abhängigkeit der Frequenz steht. Der stark nichtlineare Zusammenhang zwischen dem Gegeninduktivitätsbelag und dem Abstand zweier Leiter wird zumeist experimentell ermittelten Datenblättern mit Frequenz und Bodenleitfähigkeit als Parameter entnommen.

3. Reduktionsfaktor

(Fig. 2)

Der Reduktionsfaktor k_r stellt das Verhältnis der Längsspannung mit Abschirmung zu jener ohne Abschirmung dar; er ist von Material zu Material verschieden und ist keineswegs konstant, sondern stark spannungs- und frequenzabhängig. Die grösste Wirkung liegt meistens bei Spannungsbelägen zwischen 0,1 und 1 V/m, d. h. die Reduktionsfaktoren nehmen dort ihre kleinsten Werte an, wobei sich Stahlrohr mit k_r = 0,006 (bei 50 Hz, 4″) als weitaus wirksamste, aber auch als teuerste Schutzart präsentiert. Ist Frequenz und Spannungsbelag bekannt, so kann der Reduktionsfaktor k_{ri} aus einem für jede Abschirmungsart $_i$ separaten Kurvenblatt mit dem Manteldurchmesser als Parameter herausgelesen werden.

4. Approximation

Da für die Optimierung ein Verfahren zu wählen ist, das für die Verarbeitung auf dem Computer geeignet sein soll, müssen die Daten, welche üblicherweise aus Tabellen oder Kurven-

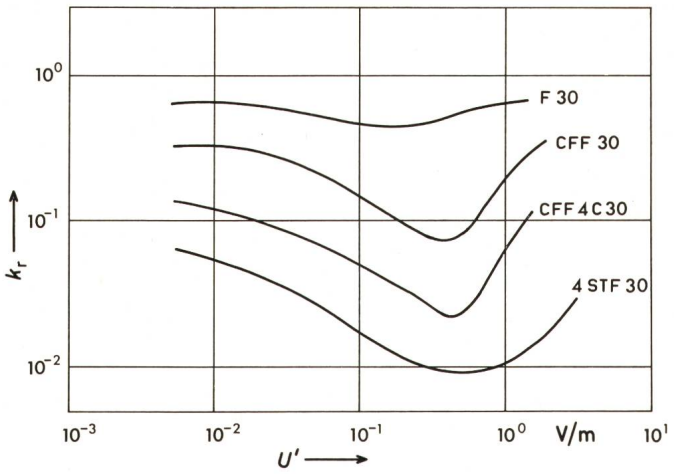

Fig. 2
Beispiele von Reduktionsfaktoren in Funktion des Spannungsbelages bei 50 Hz für verschiedene Mantelkonstruktionen

blättern abgelesen werden, während der Berechnung jederzeit verfügbar sein. Die Zusammenhänge zwischen Gegeninduktivitätsbelag und seitlichem Abstand zweier Leiter einerseits und zwischen Reduktionsfaktor und Spannungsbelag anderseits sind beide Funktionen von einer Variablen, wenn im ersten Fall die Bodenleitfähigkeit, im zweiten der Manteldurchmesser als Parameter verwendet werden. Dies erlaubt, innerhalb des Bereiches der technischen Anwendung mit einem geeigneten Approximationsverfahren für jedes Argument den zugehörigen Funktionswert mit hinreichender Genauigkeit zu ermitteln, wenn vorher eine gewisse Anzahl Stützstellen mit den entsprechenden Stützwerten eingegeben worden sind. Für das Programm wurde die Tschebyscheffapproximation gewählt, bei welcher ein Polynom gefunden wird, das (im Gegensatz zum Regressionsverfahren n-ter Ordnung) die Stützpunkte exakt durchläuft. Für die Optimierungsaufgabe wird jede Reduktionsart, die verwendet werden darf, mit dem ihr zugehörigen Polynom charakterisiert, wobei dieses durch Evaluation für jeden gewünschten Wert des Spannungsbelags den zugehörigen Reduktionsfaktor liefert.

5. Optimierungsproblem

Ist in einem zusammenhängenden Beeinflussungsgebiet der mittlere Spannungsbelag $\overline{U}_j'$ jedes Abschnittes j bekannt, so stellt sich die Frage, welche Reduktionsart wo einzusetzen ist, damit die totale induzierte Längsspannung unter einem bestimmten Wert (z. B. $U_{max} = 430$ V) gehalten wird. Es scheint beispielsweise kaum sinnvoll zu sein, die ganze Strecke mit derselben Reduktionsart auszuführen, wenn die Spannungsbeläge der verschiedenen Abschnitte unterschiedlich sind. Auch kann bei noch so guter Anpassung der Reduktionsart an den auf dem Streckenabschnitt anliegenden Spannungsbelag nicht gesagt werden, ob es nicht eine andere Kombination von Reduktionsarten gibt, welche die Spannungsbedingung ebenfalls erfüllt, aber bedeutend preisgünstiger ist. Das Problem besteht also darin, aus der beeindruckenden Anzahl theoretisch möglicher Varianten (z. B. rund 10^{24} bei 16 Reduktionsarten und 20 Streckenabschnitten) diejenige Kombination zu finden, welche die Spannungsbedingung erfüllt und am wenigsten Kosten verursacht, also

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{j=1}^{m} K_j\,[i(j)] \rightarrow \text{Min} \\ &\sum_{j=1}^{m} U_j\,[i(j)] \leqq U_{max} \end{aligned}\right\}$$

worin

j	Bezeichnung des Streckenabschnittes ($1 \leqq j \leqq m$)
m	Anzahl der Streckenabschnitte innerhalb eines zusammenhängenden Beeinflussungsgebietes
$i(j)$	Bezeichnung der Reduktionsart auf dem Streckenabschnitt j ($1 \leqq i \leqq n$)
n	Anzahl der zur Auswahl stehenden Reduktionsarten
$K_j\,[i(j)]$	Kosten des Streckenabschnittes j unter Verwendung der Reduktionsart $i(j) = l_j\,K_j'$
l_j	Länge des Streckenabschnittes j
$U_j\,[i(j)]$	Spannung über dem Streckenabschnitt j unter Verwendung der Reduktionsart $i(j) = l_j\,\overline{U}_j'\,k_{rij\,(j)}$
K_i'	Kosten für die Verwendung des Reduktionsmaterials i pro Längeneinheit
U_{max}	vorgegebener Spannungsgrenzwert für die totale Längsspannung innerhalb eines zusammenhängenden Beeinflussungsgebietes.

Es leuchtet ein, dass es nicht zweckmässig wäre, für jede der n^m Varianten die Kostensumme ($\Sigma\,K_j$) und totale Längsspannung ($\Sigma\,U_j$) zu berechnen und daraus die optimale Lösung herauszusuchen. Schon bei verhältnismässig kleinen Anzahlen n und m würde auch ein rasch arbeitender Computer viel zu viel Rechenzeit dafür benötigen. Es wird daher im folgenden ein Verfahren gezeigt, welches die sture Berechnung sämtlicher Kombinationen umgeht, aber dennoch die optimale Lösung ermittelt.

6. «Branch-and-Bound»-Methode

Für die vorliegende Optimierungsaufgabe scheidet der Simplex-Algorithmus aus, da eine direkte Beziehung zwischen Wirkung und Kosten der Reduktionsarten undefinierbar, geschweige denn linear ist. Auch das Lagrangeverfahren ist, abgesehen vom grossen Rechenaufwand bei Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit, für ganzzahlige Optimierungen ungeeignet, zumal der Reduktionsfaktor im Bereich zwischen 0 und 1 liegen muss. Man erinnert sich daher an die unter der Bezeichnung «Rucksackproblem» bekannte, klassische Aufgabe der ganzzahligen linearen Optimierung, die wie folgt formuliert werden kann: «Von einer Anzahl m verschiedener Gegenstände ist je das Gewicht und der Wert bekannt. Gesucht ist diejenige Rucksackfüllung, deren Gesamtgewicht ein vorgegebenes Maximalgewicht nicht überschreitet und deren Gesamtwert innerhalb dieser Möglichkeiten am grössten ist.»

Werden die Bezeichnungen «Gegenstände» durch «Streckenabschnitte», «Gewicht» durch «Spannung», «Wert» durch «Kosten» ersetzt und wird anstelle des «grösstmöglichen Wertes» die «kleinstmögliche Kostensumme» angestrebt, so lässt sich die Aufgabe auf das Problem der Reduktionswahl anwenden, wobei allerdings ein wesentlicher Unterschied auffällt: beim «Rucksackproblem» gibt es für jeden Gegenstand lediglich die Alternative, ihn entweder einzupacken oder wegzulassen (d. h. $n = 2$ und $i(j) = 1$ bzw. 2); in der gestellten Aufgabe sollen aber bedeutend mehr als nur 2 Reduktionsarten zur Auswahl stehen, da beispielsweise mindestens 16 Kabel-Abschirmungen im Handel erhältlich sind (d. h. $1 \leqq i(j) \leqq n$, $n \gg 2$).

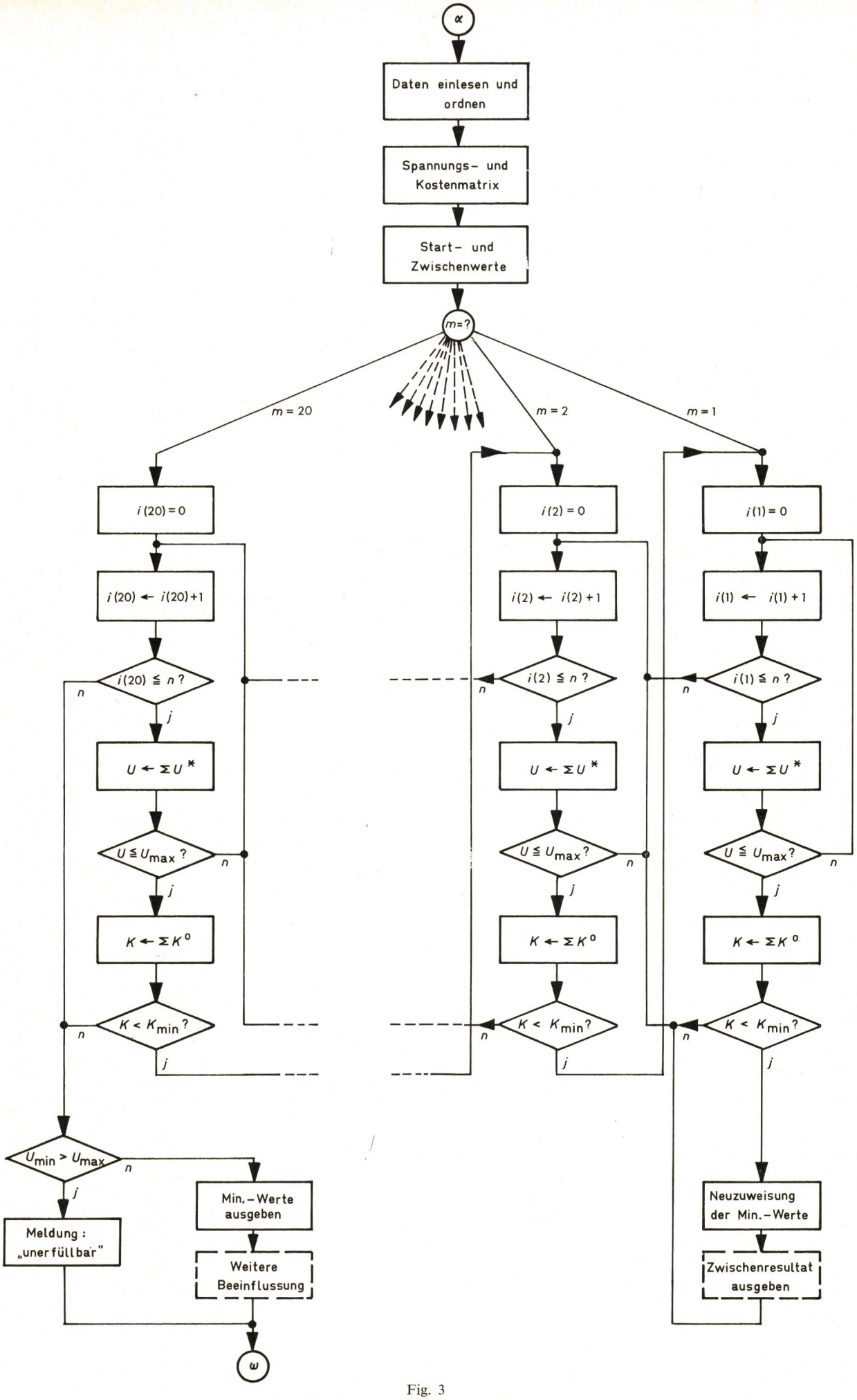

Fig. 3
Flussdiagramm des Programmes «Redopt»

Dennoch kann der Algorithmus weitgehend übernommen werden, sofern dafür gesorgt wird, dass es für den auf dem Abschnitt j angetroffenen mittleren Spannungsbelag $\overline{U}_j'$ keine Abschirmungsart gibt, welche höhere oder gleich hohe Kosten pro Längeneinheit, aber einen schlechteren (d. h. grösseren) Reduktionsfaktor als irgendeine andere, auf demselben Abschnitt wählbare Abschirmungsart mit sich bringt. Wenn diese Kontrolle vom Programm automatisch vorgenommen wird, muss bei der Eingabe der zur Auswahl stehenden Reduktionsarten auf keinerlei Bedingung bezüglich Verhältnis Wirkung zu Kosten Rücksicht genommen werden.

Der Kern des Algorithmus besteht darin, dass sukzessive bei jedem Streckenabschnitt die Frage gestellt wird, ob unter der Annahme, dass auf den Abschnitten, deren Reduktionsart noch nicht festgelegt ist, der jeweils geringstmögliche Spannungsbeitrag (U^*) geleistet wird, eine gewisse Wahl der Reduktionsart die Einhaltung des Spannungsgrenzwertes erlaubt oder nicht. Wenn nein, wird für den erwähnten Abschnitt die nächstteurere Reduktionsart gewählt und dieselbe Frage wiederholt; wenn ja, wird die gewählte Reduktionsart für den erwähnten Abschnitt vorläufig festgelegt und untersucht, ob unter der Annahme, dass von den Abschnitten, deren Reduktionsart noch nicht festgelegt ist, der jeweils geringstmögliche Kostenbeitrag (K^0) erbracht wird, es überhaupt möglich ist, das bisher gefundene Kostenminimum (zu Beginn ein willkürlicher Vergleichswert) zu unterbieten. Wenn nein, wird das bisherige Minimum weiterhin bestätigt; wenn ja, wird die ganze Fragestellung mit dem nächstfolgenden Abschnitt wiederholt. Beim ersten wie beim letzten Abschnitt wird die Untersuchung sinngemäss vorgenommen. Auf diese Weise ist es möglich, von der beeindruckenden Anzahl theoretisch möglicher Varianten sowohl unzulässige (Überschreitung der Grenzbedingung) als auch uninteressante (Überschreitung des Kostenminimums) Fälle verhältnismässig früh auszuscheiden. Der Rechenaufwand wird also dadurch erheblich reduziert.

7. Aufbau des Rechenprogramms

(Fig. 3)

Wie man sieht, eignet sich dieser Algorithmus für die Berechnung durch einen Computer. Es wurde daher ein universell anwendbares Programm geschaffen, welches praktische Aufgaben löst, bei denen gleichzeitig bis zu 20 verschiedene Streckenabschnitte mit maximal 5 verschiedenen Manteldurchmessern für $16^2/_3$ oder 50-Hz-Wechselstrombeeinflussungen optimiert werden; die Anzahl wählbarer Reduktionsarten ist dabei nicht beschränkt, wirkt sich aber in der verbrauchten Rechenzeit aus.

Folgende Daten werden für die Eingabe benötigt:

- Spannungsgrenzwert U_{max} in V;
- Anzahl der gegebenen Streckenabschnitte m (≤ 20);

```
 REDUKTIONSOPTIMIERUNG FUER  9 STRECKENABSCHNITTE MIT 13 REDUKTIONSARTEN
=========================================================================

SPANNUNGS-GRENZWERT:    430.000 VOLT

ADERPAARZAHLEN:          24        -0        -0        -0        -0

OBJEKT:          NATIONAL-STRASSE 4A (KANTON ZUG)  MIT NOK/EWZ 220KV-50HZ LEITUNG  (VERSION 2)
```

STRECKEN-NR:	LAENGE IN M:	SPANNUNGSBELAG IN V/M:	ADERPAARZAHL:
1	500.000	.024	24
2	500.000	.034	24
3	500.000	.048	24
4	500.000	.415	24
5	500.000	.573	24
6	500.000	1.004	24
7	500.000	.505	24
8	500.000	.579	24
9	750.000	.890	24

Fig. 4
Reduktionsoptimierung für 9 Abschnitte mit 13 möglichen Reduktionsarten am Beispiel der N4A
Die Streckenabschnitte werden mit der zugehörigen Länge, dem Spannungsbelag (ohne Reduktion) und den Aderpaarzahlen definiert

- Anzahl der zur Auswahl stehenden Reduktionsarten n (beliebig viele) inkl. Bezeichnung;
- Vorkommende Aderpaarzahlen (bzw. Manteldurchmesser) (Anzahl $k \leq 5$) auf allen Streckenabschnitten;
- Längen der Streckenabschnitte lj in m;
- Kosten der Reduktionsarten je Längeneinheit Ki' in Fr./m;
- Koeffizienten der Polynome zur Charakterisierung des Reduktionsfaktors als Funktion des Spannungsbelages;
- Mittlere Spannungsbeläge der Streckenabschnitte $\overline{U}j'$ in V/m.

Als Resultate werden demgegenüber folgende Werte ausgegeben:

- Induzierte Spannung in V; falls diese die gegebene Grenzbedingung nicht erfüllt, erfolgt ein Hinweis (d. h. die Optimierungsaufgabe besitzt keine Lösung);
- Totale Kosten in Franken der optimalen Lösung;
- Für jeden Streckenabschnitt die Bezeichnung der optimalen Reduktionsart, die Teilspannung in V sowie die Teilkosten in Franken;
- Als Option: Längsspannung derselben Strecke unter einer anderen Beeinflussung bei Verwendung der oben gefundenen optimalen Reduktionsarten.

Nach dem Einlesen der Daten wird zunächst die Reihenfolge der Reduktionsarten in einer nach Kosten je Längeneinheit aufsteigenden Reihenfolge geordnet. Anschliessend wird die Kostenmatrix aufgestellt, d. h. auf Grund der bekannten Längen werden die Kosten jedes Streckenabschnittes mit jeder Reduktionsart berechnet und abgespeichert, wobei dank der Angabe der Aderpaarzahlen automatisch die richtigen Daten ausgewählt werden. Sodann wird mit Hilfe der charakteristischen Polynome die Spannungsmatrix gebildet, d. h. auf Grund der bekannten Längen und Spannungsbeläge die Spannung jedes Streckenabschnittes mit jeder Reduktionsart, wobei wiederum automatisch die richtige Datenauswahl erfolgt. Ausserdem wird bei diesem Rechnungsgang noch die Einhaltung der im vorigen Kapitel erwähnten Bedingung, dass aufsteigende Kosten eine bessere Reduktionswirkung zeigen, kontrolliert; wo dies nicht zutrifft, wird für die Ausscheidung der betreffenden Reduktionsarten gesorgt.

Als weitere Vorbereitungsmassnahmen für den eigentlichen Optimierungsteil werden Zwischenwerte, die während des «Branch-and-Bound»-Verfahrens immer wieder verwendet werden, abgespeichert zwecks Einsparung von Rechenzeit; ferner werden Startwerte für das Minimum sowie für die Zähler der übersprungenen Programmschleifen festgesetzt.

Nun beginnt der eigentliche Optimierungsteil gemäss dem im vorigen Kapitel erwähnten Verfahren. Wird in der innersten Schleife die Frage, ob das bisherige Kostenminimum unterschritten wird, bejaht, erfolgt für dieses eine neue Wertzuweisung auf Grund der für jeden Abschnitt ausgewählten Reduktionsarten. Diese gehen direkt aus den Schleifenzählern hervor und werden als Komponenten eines sog. Bezeichnungsvektors ebenfalls zusammen mit der resultierenden Längsspannung so lange abgespeichert, bis ein neues Minimum gefunden wird. Diese Werte können als Zwischenresultat auf Wunsch ausge-

BEZEICHNUNG DER RED-TYPE:	PREIS PRO LAENGENEINHEIT:	(GEORDNET)
5F24	10.19	
5CF24	12.84	
5FF24	12.94	
5F2C24	13.61	
5F4C24	15.23	
5CFF24	15.99	
5CF2C24	16.40	
5FF2C24	16.56	
5CF4C24	18.06	
5FF4C24	18.23	
5CFF2C24	19.72	
5CFF4C24	21.40	
5-4STF24	24.44	

INDUZIERTE SPANNUNG IN VOLT: 418.544 TOTALE KOSTEN IN FRANKEN: 65137.50

STRECKENABSCHNITT:	OPTIMALE REDUKTIONSART:	TEILSPANNUNG:	TEILKOSTEN:
1	5F24	7.666	5095.00
2	5F24	10.715	5095.00
3	5F24	13.817	5095.00
4	5CF24	45.632	6420.00
5	5CFF24	28.138	7995.00
6	5CF4C24	75.541	9030.00
7	5CFF24	22.376	7995.00
8	5CF24	87.131	6420.00
9	5CFF24	127.529	11992.50

Fig. 5
Reduktionsarten, Resultat

Oben werden die zur Auswahl stehenden Reduktionsarten nach aufsteigenden Preisen geordnet, wobei die Koeffizienten der Reduktionsfunktion in Abhängigkeit des Spannungsbelages hier nicht ausgedruckt sind.

Unten: als Resultat die optimale Zuordnung der Reduktionsarten der einzelnen Abschnitte. Die maximale Kostensumme wird bei einer Längsspannung von ca. 418 V erreicht und beträgt Fr. 63 137.50.

druckt werden, was sich besonders bei grossen Problemen, wo die Gefahr des Anstossens an die «Time Limit» (maximal erlaubte Rechenzeit eines Jobs) vorhanden ist; das Programm könnte dann unter Umständen mit den Daten des bisherigen Minimums als Startwerte wieder aufgenommen werden.

Wird in der äussersten Schleife festgestellt, dass es unmöglich ist, das bisherige Kostenminimum zu unterbieten, oder stehen keine weiteren Reduktionsarten mehr zur Verfügung, die es erlauben würden, die Spannungsgrenzbedingung zu erfüllen, ist der Optimierungsvorgang abgeschlossen, und es folgt die Ausgaberoutine, wobei entweder ein Hinweis auf die Unerfüllbarkeit der Spannungsgrenzbedingung gegeben oder das vorläufige Minimum als Resultat der Optimierung herausgeschrieben wird. Die erwähnte Option dient dazu, weitere Beeinflussungen derselben Strecke in Kontrolle zu halten.

8. Praktisches Beispiel

Das Notruftelefonkabel der Nationalstrasse 4a im Kanton Zug unterliegt nebst anderen Einflüssen auch der Beeinflussung durch eine 220-kV-50-Hz-Freileitung. Das Beeinflussungsgebiet ist, wie in Fig. 4 ersichtlich, in 9 Streckenabschnitte verschiedener Längen und mittlere Spannungsbeläge eingeteilt, die in einer früheren Rechnung ermittelt worden sind. Oben auf Fig. 5 sind die 13 zur Auswahl stehenden Reduktionsarten für Rohranlagen bereits in der nach aufsteigenden Preisen geordneten Reihenfolge ausgedruckt, wobei vom effektiven Preis für 1 m 4″ Stahlrohr mit F-Armierungskabel der Preis für 1 m Kunststoffrohr, welches bei den anderen Reduktionsarten erforderlich ist, abgezogen wurde, um auch mechanisch vergleichbare Verhältnisse anzustreben. Nebst den Preisen wurden für jede Reduktionsart die zur Charakterisierung der Abhängigkeit zwischen Reduktionsfaktor und Spannungsbelag notwendigen Koeffizienten eingegeben. Mit diesen Daten ist die Optimierungsrechnung durchgeführt worden.

Das Ergebnis befindet sich unten auf Fig. 5. Mit 418V liegt die induzierte Längsspannung, wie es verlangt war, unter dem Grenzwert von 430 V. Die optimale Lösung kostet Fr. 65137.50, wenn auf den Streckenabschnitten die in der Tabelle (Fig. 5) angegebenen Reduktionsarten eingesetzt werden. Dieselbe Tabelle zeigt übrigens noch die Zusammensetzung der Spannung und Kosten. Fig. 6 zeigt die Liste der Zwischenresultate, die wie folgt zu interpretieren sind: die ersten 9 Kolonnen zeigen die auf dem entsprechenden Streckenabschnitt eingesetzte Reduktionsart an, wobei 1 die billigste (5 F 24) und 13 die teuerste (5-4 STF 24) bedeutet. In der zweitletzten Kolonne steht der Wert der induzierten Spannung (stets innerhalb des zulässigen Bereiches), in der äussersten Kolonne rechts die totalen Kosten. Sobald eine Lösung gefunden wird, die der Spannungsbedingung genügt und das bisherige Kostenminimum unterschreitet, wird eine neue Zeile ausgedruckt. Die letzte Zeile stimmt mit der optimalen Lösung (siehe Fig. 5) überein. Bemerkenswert ist übrigens der fehlende Zusammenhang zwischen der erreichten Spannung und den zugehörigen Kosten: z. B. befindet sich auf der 3. Zeile eine Lösung, die bis 3 mV an den Spannungsgrenzwert herankommt, aber mit über Fr. 100000.– bedeutend teurer ist als beispielsweise die Lösung auf der 9.-untersten Zeile mit Fr. 69115.–, welche jedoch den erlaubten Spannungsbereich sehr schlecht ausnützt, ist doch der Grenzwert um mehr als 20 V unterschritten. Dies zeigt, wie gross die Gefahr zu Fehlüberlegungen ist, wenn ein

ZWISCHENRESULTATE

13	13	13	13	13	13	12	13	1	429.801	103882.50
13	12	13	12	13	13	13	13	1	429.805	102362.50
9	13	13	12	13	13	13	13	1	429.997	100692.50
13	9	7	13	13	13	13	13	1	429.907	98192.50
9	9	9	13	13	13	13	13	1	429.967	95832.50
13	13	7	11	6	13	6	2	2	429.687	86760.00
13	9	9	11	6	13	6	2	2	429.992	84400.00
9	9	13	11	6	13	6	2	2	429.487	84400.00
12	7	7	12	6	13	6	2	2	429.894	82060.00
9	9	7	12	6	13	6	2	2	429.451	81220.00
7	7	9	12	6	13	6	2	2	429.915	80390.00
12	9	2	6	11	13	6	2	2	429.795	80270.00
9	7	5	6	11	13	6	2	2	429.641	78965.00
7	7	6	6	11	13	6	2	2	429.508	78515.00
7	5	7	6	11	13	6	2	2	429.163	78135.00
2	7	7	6	11	13	6	2	2	429.883	76940.00
2	7	2	9	11	13	6	2	2	429.923	76195.00
7	1	2	11	11	13	6	2	2	429.604	75700.00
2	2	2	11	11	13	6	2	2	428.241	75245.00
1	5	2	11	11	13	6	2	2	429.400	75115.00
1	2	2	12	11	13	6	2	2	428.635	74760.00
1	1	5	11	12	13	6	2	2	429.292	74630.00
1	1	2	12	12	13	6	2	2	428.202	74275.00
2	1	2	6	11	13	11	2	2	429.584	73920.00
1	2	1	9	11	13	11	2	2	429.656	73630.00
1	1	1	11	11	13	11	2	2	428.548	73135.00
1	7	1	6	11	13	2	6	2	429.217	72510.00
2	1	2	6	11	13	2	6	2	428.466	72055.00
1	1	5	6	11	13	2	6	2	429.950	71925.00
1	2	1	9	11	13	2	6	2	428.539	71765.00
1	1	1	11	11	13	2	6	2	427.430	71270.00
2	1	1	6	11	12	6	6	2	429.695	70785.00
1	2	1	6	11	12	6	6	2	427.946	70785.00
1	1	1	9	11	12	6	6	2	427.842	70495.00
1	1	1	6	12	12	6	6	2	427.514	70300.00
2	1	2	2	6	13	6	6	2	429.288	70190.00
1	1	1	6	6	13	6	6	2	409.560	69115.00
2	1	1	6	6	13	2	6	3	429.156	68940.00
1	1	1	9	6	13	2	6	3	427.302	68650.00
1	1	1	6	6	12	6	6	3	426.709	67670.00
1	1	1	2	6	13	6	6	3	416.399	67615.00
1	2	1	6	6	9	2	2	6	429.552	66462.50
1	1	1	9	6	9	2	2	6	429.448	66172.50
1	1	1	6	6	11	2	2	6	417.402	65967.50
1	1	1	2	6	9	6	2	6	418.544	65137.50

Fig. 6
Darstellung der Zwischenresultate des Optimierungsvorgangs

Die letzte Kolonne zeigt, wie sich sukzessive die Kostensumme vermindert, wobei die Längsspannung in der zweitletzten Kolonne stets der Restrikition (< 430 V) genügt. Die linken neun Kolonnen zeigen mit einer Nummer die den Abschnitten zugehörige Reduktionsart an, wobei 13 die teuerste, (5-4STF 24) bzw. 1 die billigste (5F24) bedeuten

TABELLE DER VARIATIONSMOEGLICHKEITEN

STPECKENABSCHNITT:	REDUKTIONSART:	SPANNUNG IN VOLT:	KOSTEN IN FRANKEN:
1	5F24	7.666	5095.00
1	5CF24	4.997	6420.00
1	5FF24	*00000.000	6470.00
1	5F2C24	*00000.000	6805.00
1	5F4C24	3.614	7615.00
1	5CFF24	*00000.000	7995.00
1	5CF2C24	1.942	8200.00
1	5FF2C24	*00000.000	8280.00
1	5CF4C24	1.378	9030.00
1	5FF4C24	*00000.000	9115.00
1	5CFF2C24	*00000.000	9860.00
1	5CFF4C24	1.084	10700.00
1	5-4STF24	.481	12220.00
2	5F24	10.715	5095.00
2	5CF24	6.297	6420.00
2	5FF24	*00000.000	6470.00
2	5F2C24	*00000.000	6805.00
2	5F4C24	4.787	7615.00
2	5CFF24	4.520	7995.00
2	5CF2C24	2.452	8200.00
2	5FF2C24	*00000.000	8280.00
2	5CF4C24	1.715	9030.00
2	5FF4C24	*00000.000	9115.00
2	5CFF2C24	*00000.000	9860.00
2	5CFF4C24	1.279	10700.00
2	5-4STF24	.573	12220.00
3	5F24	13.817	5095.00
3	5CF24	7.473	6420.00
3	5FF24	*00000.000	6470.00
3	5F2C24	*00000.000	6805.00
3	5F4C24	6.287	7615.00
3	5CFF24	5.590	7995.00
3	5CF2C24	2.910	8200.00
3	5FF2C24	*00000.000	8280.00
3	5CF4C24	2.074	9030.00
3	5FF4C24	*00000.000	9115.00
3	5CFF2C24	*00000.000	9860.00

Fig. 7
Ausschnitt aus Spannung-/Kosten-Matrix

Die Spannungen und zugehörigen Kosten jedes Abschnittes werden für jede Reduktionsart berechnet, wobei Varianten, welche eine wirksamere, aber dennoch nicht teurere Alternative besitzen, ausgeschieden werden.

solches Problem überschlagsmässig im Kopf zu lösen versucht wird.

Fig. 7 zeigt die Variationsmöglichkeiten in einer Spannungs-Kostenmatrix. Hier sind die Werte jedes Abschnittes mit jeder Reduktionsart dargestellt, wobei solche, die trotz höheren Preises keine kleinere Spannung aufweisen, ausgeschieden werden. Es ist zu beachten, dass eine Reduktionsart je nach Spannungsbelag, der auf der betreffenden Strecke angetroffen wird, ein verschiedenes Verhältnis von Wirkung zu Preis zeigen kann und demzufolge auf gewissen Abschnitten zu empfehlen, auf andern vielleicht aber auszuscheiden ist. Dies ist eine Folge der starken Nichtlinearität des Reduktionsfaktors in Abhängigkeit des Spannungsbelags.

Das gezeigte Beispiel wurde mit dem universell verwendbaren FORTRAN-Programm gerechnet, und es wurden auf dem System CDC 6500 inkl. Input/Output weniger als 10″ benötigt.

Zum Schluss soll noch eine Bemerkung zur Genauigkeit gemacht werden. Diese hängt von der Güte der Eingabedaten sowie vom Fehler bei der Approximation ab. Während letzterer auch im ungünstigsten Fall ± 5% (relativ) nicht übersteigt, ist die Wahl der Streckeneinteilung von ausschlaggebender Bedeutung, wie ein einfaches Beispiel belegt:

Zwei Streckenabschnitte haben je 500 m Länge und 300 bzw. 100 mV/m als Spannungsbeläge, was einer Längsspannung von 200 V entspricht. Bei einer Reduktion mit 4″-Stahlrohr für $16^2/_3$-Hz-Beeinflussung wäre die induzierte Spannung noch 7,4 V. Wird demgegenüber anstelle der beiden vorigen ein einziger Abschnitt von 1000 m Länge und einem Spannungsbelag von 200 mV/m gewählt, so ist die Längsspannung zwar nach wie vor 200 V, doch resultiert bei derselben Reduktion nur eine induzierte Spannung von 6,4 V. Der Grund dafür liegt darin, dass ungeachtet der Spannungsabhängigkeit der Reduktionsfaktoren mit Mittelwerten des Spannungsbelags gerechnet wird.

Wird jedoch diesem Umstand bei der Streckeneinteilung soweit als möglich Rechnung getragen, so lassen sich durchaus brauchbare Resultate erzielen. Man besitzt somit eine Methode, die es erlaubt, gegenüber früheren Berechnungen grosse Kosten-Beträge durch zweckmässige Wahl der Reduktionsarten einzusparen.

9. Zusammenfassung

Die meisten Fernmeldekabel sind elektromagnetischen Fremdfeldbeeinflussungen ausgesetzt. In diesen Kabeln werden gelegentlich Spannungen induziert, die Mensch und Material

gefährden, weil deren Betrag einige tausend Volt erreichen kann.

Mittels geeigneter Kabelarmierungen lassen sich diese Spannungen auf zulässige Werte reduzieren. Das beschriebene Rechenverfahren erlaubt das Auffinden derjenigen Schutzmassnahme, die mit minimalsten Investitionskosten die gewünschte Spannungsbegrenzung ergibt.

Anhand eines praktischen Beispiels wird die Wirksamkeit dieses Optimierungsverfahrens dargelegt.

Literatur

[1] *E. Stiefel:* Einführung in die numerische Mathematik. 2. Auflage, Stuttgart, Teubner-Verlag, 1963.

[2] *G. B. Dantzig:* Lineare Programmierung und Erweiterungen. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1966.

[3] *R. Sauer* und *I. Szabo:* Mathematische Hilfsmittel des Ingenieurs. Teil III. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1968.

Adresse der Autoren:

H. Mazan und *H. Burckhardt,* Dipl. Elektroingenieure ETH, Ingenieurbüro Sauber + Gisin AG, Höschgasse 45, 8008 Zürich.