

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 75 (1984)

**Heft:** 23

**Artikel:** Optimierung des Überspannungsschutzes elektrischer Anlagen

**Autor:** Stephanides, H. V.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-904521>

### **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:** 02.07.2025

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

# Optimierung des Überspannungsschutzes elektrischer Anlagen

H. V. Stephanides

*Um SF<sub>6</sub>-isolierte gekapselte Schaltanlagen gegen Blitzüberspannungen schützen zu können, muss der Spannungsverlauf bei Blitzschlägen berechnet werden. Die Anlage und die angeschlossenen Leitungen, speziell die Freileitungen, sind dazu möglichst genau zu simulieren. Dazu sowie zur Lösung von elektrischen und mechanischen Problemen aus der Schaltertechnik eignet sich ein neues Transienten-Programm. Sein praktischer Wert wird durch Vergleich mit Anlagemessungen und anhand von Beispielen demonstriert.*

*Pour pouvoir protéger les installations de couplage blindées, isolées au SF<sub>6</sub> contre les surtensions dues à la foudre, il faut calculer la variation de la tension provoquée par les coups de foudre. Dans ce but, l'installation et les lignes qui y sont raccordées, surtout les lignes aériennes, doivent être simulées avec une grande précision. Un nouveau programme applicable à des effets transitoires permet de le faire et de résoudre également des problèmes d'ordre électrique et mécanique concernant les disjoncteurs. La valeur pratique de ce programme est démontré par comparaison avec des résultats de mesures et par des exemples.*

## 1. Einleitung

Für die Berechnung der transienten Überspannungen an elektrischen Schaltanlagen gibt es bereits seit einiger Zeit Computerprogramme [1]. Diese benutzen vereinfachte, aus den Differentialgleichungen der Wellenleiter abgeleitete Rechenverfahren [2; 3]. Mit diesen Programmen erzielt man eine ähnliche Genauigkeit wie mit Messungen an Anlagemodellen [4], da beide Verfahren die Blitzüberspannungen in der Station üblicherweise aus einer am Stationseingang eintreffenden Welle berechnen. Auch die zur Freileitung fließenden Blitzströme und die Überschläge zwischen den Leitern lassen sich simulieren. Hier zeigen sich jedoch Grenzen. Die un stetigen Veränderungen beim Einsetzen des Blitzstromes und bei den Überschlägen stören den Rechnungsablauf. Die Rechnungen werden dadurch oft fehlerhaft und unbrauchbar. Direkte Berechnungen der Überspannungen aus den Blitzströmen sind meist mit grossem Aufwand verbunden, vor allem dann, wenn mit verzweigten Leitungen und mit Erdüberschlägen zu rechnen ist [5].

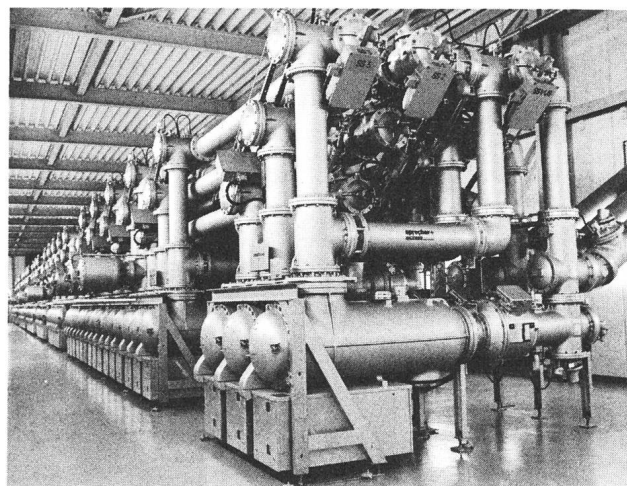
Neue technische Entwicklungen bringen neue schutztechnische Probleme

mit sich. SF<sub>6</sub>-isolierte gekapselte Schaltanlagen [6] werden immer häufiger eingesetzt (Fig. 1), da sie nur einen Bruchteil des Raumes von konventionellen Schaltanlagen beanspruchen und keine offenen, auf Hochspannung liegenden Teile besitzen. Bei der Entwicklung von Konzepten zum Schutz solcher Anlagen zeigten sich einige zusätzliche Probleme:

- Bei Spannungsimpulsen, die kürzer als 1  $\mu$ s sind, wird die elektrische Festigkeit bei SF<sub>6</sub>-Gasisolationen kleiner als bei Luftisolationen mit gleicher  $\frac{1}{50}$ - $\mu$ s-Stossüberschlagspannung. Bei sinkender Impulsdauer verstärkt sich dieser Einfluss [7].
- Nach Überschlägen in gekapselten Anlagen sind Reparaturarbeiten erforderlich.
- Die Überspannungen müssen deshalb in der ganzen Anlage begrenzt werden.

Für die Lösung von Schutzproblemen an Freiluft-Schaltanlagen genügen die ursprünglich vorhandenen Programme. Auch bei der Planung des Überspannungsschutzes von SF<sub>6</sub>-isolierten gekapselten Schaltanlagen können diese angewendet werden [8]. Der Aufwand ist dabei aber relativ gross,

**Fig. 1**  
SF<sub>6</sub>-isolierte gekapselte Schaltanlage im Kraftwerk Heilbronn (Energieversorgung Schwaben)



## Adresse des Autors

H. V. Stephanides, Dr. phil., Sprecher + Schuh AG, Physiklabor, 5036 Oberentfelden.

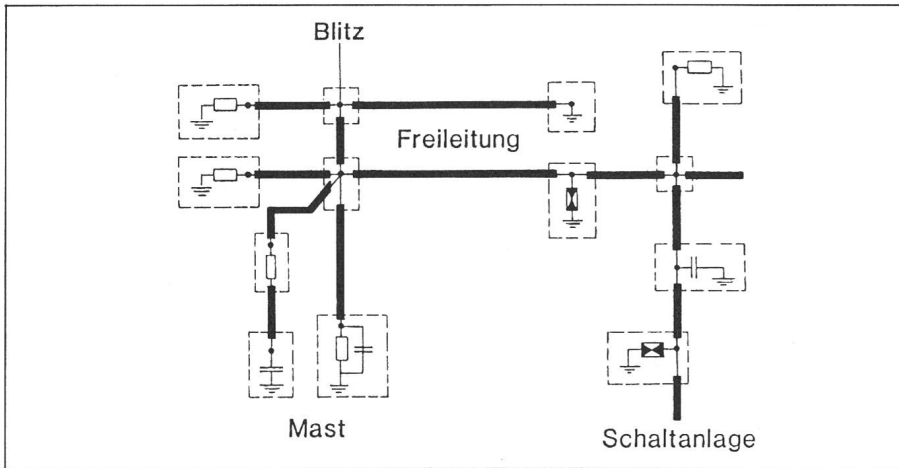
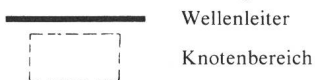


Fig. 2 Beispiel eines Netzwerkes aus Wellenleitern und Knotenbereichen

Simulation eines Blitzschlages in einen Leitungsmast mit anschliessender Freileitung und Schaltanlage.



Man beachte, dass es sich um eine vereinfachte einphasige Darstellung handelt.

da man die Überspannungen meist aus dem Blitzstrom berechnen muss.

Zur Dimensionierung des Überspannungsschutzes einer Anlage sind zahlreiche Berechnungen erforderlich, entsprechend den verschiedenen möglichen Schaltzuständen und Blitzschlägen. Man braucht dafür ein stabiles und einfach anwendbares Programm mit tragbaren Rechenzeiten. Ein solches Programm ist das bei Sprecher + Schuh entwickelte Rechenprogramm SPREDIS, bei dessen Entwurf von Anfang an nur Formeln und Programmteile verwendet wurden, bei denen keine Instabilitäten zu befürchten waren. Wie die folgenden Anwendungsbeispiele zeigen, hat sich dieses Programm gut bewährt.

## 2. Rechenprogramm SPREDIS

Das wichtigste Ziel bei der Entwicklung des Programms war eine gute Stabilität bei Unstetigkeiten und Zustandsänderungen. Durch konsequente Verwendung von analytischen Lösungen der Differentialgleichungen und von Impulsantwortfunktionen konnte dieses Ziel erreicht werden [9].

Durch Anwendung der Distributionstheorie wurden bekannte, nur für analytische Funktionen definierte Formeln so erweitert, dass sie auch für un stetig einsetzende Funktionen gelten [10; 11]. Die dafür benutzten mathematischen Grundlagen, die auch in der modernen Fernmeldetechnik und Automatik angewendet werden, sind

verhältnismässig kompliziert. Im folgenden sei deshalb nur ein kurzer Überblick über den Aufbau des Programms gegeben. In einer späteren Publikation folgt eine genaue Beschreibung der verwendeten Gleichungen und der mathematischen Zusammenhänge.

### 2.1 Netzwerk

Das Programm dient zur Berechnung des resultierenden Vorgangs an Netzwerken aus *Wellenleitern* und

*Knotenbereichen*, hervorgerufen durch anregende Ströme und Spannungen. Die Netzwerke werden dazu in Vielpole zerlegt [12]; den Wellenleitern entsprechen dabei Vierpole mit zwei Klemmenpaaren, den Knotenbereichen allgemeine Vielpole mit einer wechselnden Anzahl von Klemmenpaaren (Fig. 2). Diese Vielpole sind anhand der folgenden Regeln zu kombinieren:

- Alle Anregungen wirken in Knotenbereichen,
- die Enden der Wellenleiter werden in Knotenbereichen verbunden,
- zwischen zwei Knotenbereichen müssen immer Wellenleiter liegen.

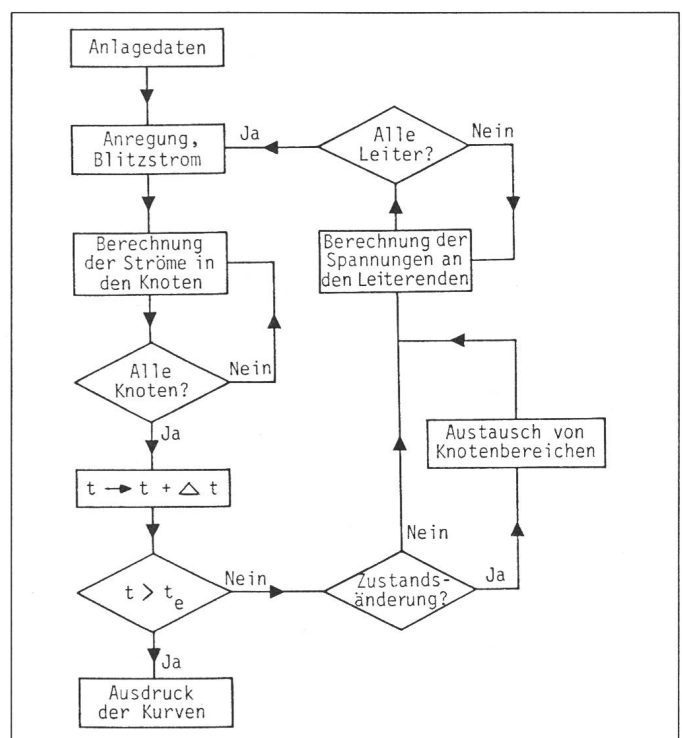
Die Ströme werden in den Knotenbereichen berechnet, die Spannungen an den Enden der Wellenleiter. Zur Berechnung der Spannungen dienen die Gleichungen der Leitungswellen:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{L'} \frac{\partial i}{\partial x} = F_1(u, i) \quad (1)$$

$$\frac{\partial i}{\partial t} - \frac{1}{C'} \frac{\partial u}{\partial x} = F_2(u, i) \quad (2)$$

$L'$  und  $C'$  sind die auf die Längeneinheit bezogenen Serieinduktivitäten und Erdkapazitäten des Wellenleiters.  $F_1$  und  $F_2$  sind Störungsglieder, die für die Wellendämpfung massgeblich sind. Ihr Einfluss wird bei der Lösung der Gleichung mit Hilfe von numeri-

Fig. 3 Computerprogramm SPREDIS, Flussdiagramm



schen Methoden erfasst [13]. Das Integral dieser Gleichungen enthält als Konstanten die Wellenlaufzeit  $T$  und den Wellenwiderstand  $Z_w$ .

### 2.2 Schrittweise Berechnung des transienten Vorgangs

Die Berechnung erfolgt anhand der Figur 3. Zunächst werden die Daten eingelesen und die später benötigten Koeffizienten ermittelt, dann folgt die Berechnung der Änderungen in den Netzwerken, die in gleichbleibenden Zeitschritten (digitale Simulation) vorgenommen wird. Es wird dabei folgendermassen vorgegangen:

- Die Vorgänge in den Vier- bzw. Vielpolen werden voneinander unabhängig berechnet.

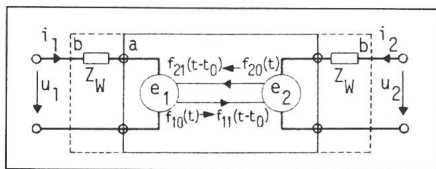


Fig. 4 Wellenleiter-Vierpol mit Ersatzschema

- a Wellenleiter-Vierpol
- a + b erweiterter Wellenleiter-Vierpol
- $i_i$  Leiterstrom als Eingangsgrösse
- $e_i$  EMK der Wellen als Ausgangsgrösse
- $f_{ij}$  Strom- bzw. Spannungswelle
- $i = 1$  links bzw. von links nach rechts laufend
- $i = 2$  rechts bzw. von rechts nach links laufend
- $j = 0$  eintretende Welle
- $j = 1$  austretende Welle (zeitverzögert und verformt)
- $t_0$  Laufzeit
- $Z_w$  Wellenwiderstand

- Jedem Wellenleiter entspricht ein Vierpolersatzschema (Fig. 4). Die Ströme  $i$  wirken als Eingangsgrößen. Ausgangsgrößen sind die von den ankommenden Stromwellen hervorgerufenen Summenspannungen. Diese werden als elektromotorische Kräfte (EMK)  $e$  bezeichnet, da sie während der Wellenlaufzeit  $t_0$  von den Vorgängen ausserhalb des Vierpols unabhängig sind.

- Die Spannungen an den Leiterenden erhält man durch Überlagerung der EMK und der direkten Spannungsabfälle  $Z_w i$  der Wellenleiterströme. Die Berechnung erfolgt wie in Figur 4 [14] angegeben.

- Die Knotenbereiche sind Vielpole in der Art des Beispiels in Figur 5, wobei die Reihenschaltungen von Ersatzspannungsquellen und Wellenwiderständen den jeweiligen Grössen der Figur 4 entsprechen.

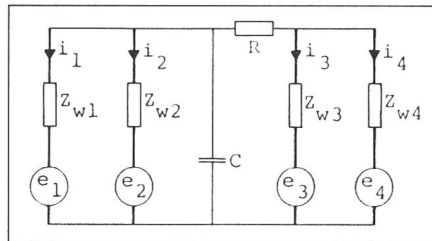


Fig. 5 Beispiel eines Knotenbereichs-Vielpols

- $e_i$  Wellenleiter-EMK als Eingangsgrösse
- $i_i$  Leiterstrom als Ausgangsgrösse
- $Z_w$  Wellenwiderstände der Leiter
- $R, C$  zusätzliche konzentrierte Elemente

Als Eingangsgrößen wirken die Anregungsfunktionen und die EMK, Ausgangsgrößen sind die zu den Wellenleitern fließenden Ströme.

Die Änderungen werden in jedem Zeitschritt getrennt berechnet. Entsprechend Figur 3 geschieht dies in zwei Gruppen:

- Berechnung der EMK aus den Strömen der Wellenleiter-Vierpole (Fig. 4),
- Berechnung der Ströme aus den Anregungen und den EMK in den Knotenbereichs-Vielpolen (Fig. 5).

### 2.3 Wellenleiter

Die Spannungen an den Enden der Wellenleiter werden durch Lösen der Wellengleichungen (1) und (2) aus den in die Vierpole hineinfließenden Strömen berechnet. Die Lösung dieser Gleichungen beschreibt Leitungswellen, welche die Leiter in beiden Richtungen durchlaufen. Die ersten Wellen werden durch die zum Leiter fließenden Ströme hervorgerufen. Weitere Wellen entstehen durch Reflexionen an den Leiterenden. Sie bestehen aus der am unbelasteten Leiterende reflektierten Welle und der Rückwirkung des anschliessenden Knotenbereiches (zusätzliche, in den Vierpol fließende Stromkomponente).

Bei jedem Durchlaufen der Leitung werden diese Wellen gedämpft. Im Programm SPREDIS wird dies rechnerisch durch Faltung mit der Verzerrungsimpulsantwort  $G\delta(t-t_0)$  berücksichtigt, welche durch Anwendung eines verallgemeinerten Differentialoperators  $G$  auf den Einheitsimpuls  $\delta(t-t_0)$  berechnet wird. Aufgrund der für Unstetigkeiten gültigen Rechenregel [11] gilt

$$G\delta(t-t_0) = [G\varepsilon(t-t_0)]' \quad (3)$$

d.h., die Verzerrungsimpulsantwort entspricht der ersten Ableitung der

Verzerrungsschrittantwort  $G\varepsilon(t-t_0)$ , welche durch Anwendung des Operators  $G$  auf den Einheitsschritt  $\varepsilon(t)$  erhalten wird. Es lassen sich so alle linearen Dämpfungseinflüsse erfassen [13], einschliesslich der Wirkung der Stromverdrängung im Erdreich<sup>1)</sup>.

Werden Wellenleiter parallel verlegt, so werden die Vorgänge in den Leitern voneinander abhängig. Zusätzliche Kapazitäten und Gegeninduktivitäten vermitteln diese Wechselwirkung.

In diesem Fall teilen sich die Wellen in verschiedene Komponenten auf, entsprechend den verschiedenen Stromkreisen, die sich teils über die Leiter und teils über die Erde schliessen. Diese Wellenkomponenten werden verschiedenartig gedämpft. In der Rechnung wird dies folgenderweise berücksichtigt:

- Die Spannungen und Ströme an den parallelen Leitern werden zu Komponenten von Vektoren,
- an die Stelle des Wellenwiderstandes des einzelnen Leiters tritt die Wellenwiderstandsmatrix der Leitung,
- den EMK in Figur 4 werden zusätzliche, von den Strömen in den anderen Leitern induzierte Spannungskomponenten überlagert.

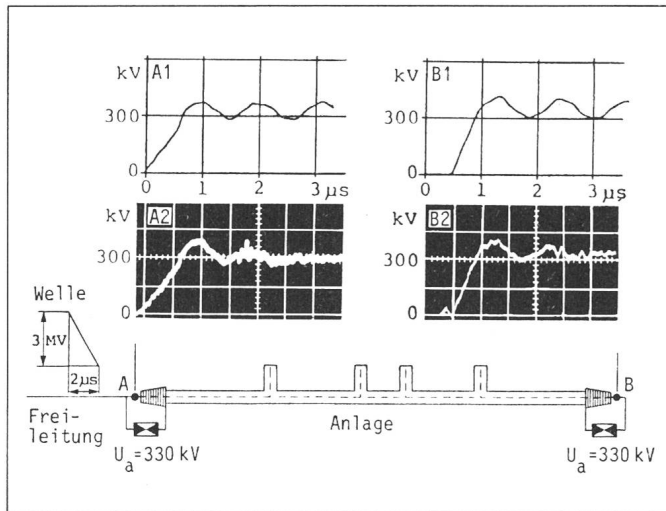
### 2.4 Knotenbereiche

In den Knotenbereichen werden die Enden der Wellenleiter untereinander und mit den Anregungen verbunden. Zur Berechnung der Ströme in solchen Knotenbereichen benutzt man spezielle Ersatzschaltungen, ähnlich dem Beispiel in Figur 6. Den Leiterenden entsprechen darin Reihenschaltungen von EMK und ohmschen Widerständen.

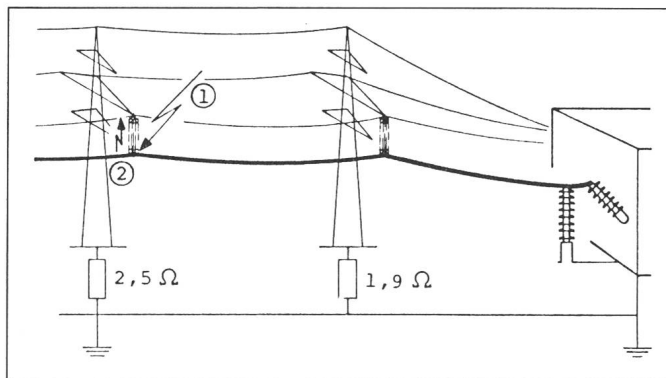
Die Ströme zu den Wellenleiterenden berechnet man durch numerische Auswertung der analytischen Lösungen der Gleichungen der Kreise. Gleichungen von Knotenbereichen mit nichtlinearen Impedanzen werden in jedem Zeitschritt durch lineare Gleichungen angenähert. Bereiche, in denen Enden parallel verlegter Leiter verknüpft sind, werden zu Gruppen zusammengefasst. Die Ströme zu den Leiterenden werden in diesen Gruppen gemeinsam berechnet.

<sup>1)</sup> In den meisten Programmen erfasst man die Stromverdrängung im Erdreich durch Anwendung von Fouriertransformationen.

**Fig. 6**  
**Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Spannungskurven**  
 an der gekapselten Schaltanlage des Kraftwerks Heilbronn. Anregung durch Leitungswellen in der Freileitung.  
 A1, B1: gerechnete Spannung an den Punkten A und B  
 A2, B2: gemessene Spannung an den Punkten A und B  
 $U_a$ : Begrenzungs-spannung der Überspannungsableiter



**Fig. 7**  
**Situation der Anlage Heilbronn bei der Berechnung der Blitzüberspannungen**  
 1 Direkter Blitzschlag  
 2 Überschlag an Isolator



### 3. Berechnung von Überspannungen

Bei der Berechnung von Überspannungen an gekapselten Schaltanlagen [6] hat sich das Programm vielfach bewährt. Die nachstehenden Beispiele, die sich auf die Schaltanlage Heilbronn (Fig. 1) beziehen, sollen einen Eindruck davon geben.

#### 3.1 Vergleich zwischen Rechnung und Anlagemessung

Um zu überprüfen, wie weit die berechneten Kurven mit den tatsächlichen, an Anlagen auftretenden Spannungen übereinstimmen, wurden sie mit gemessenen Kurven verglichen. Die Messungen erfolgten in Zusammenarbeit mit der Messgruppe der Energieversorgung Schwaben (EVS) unter Anwendung der in [15] beschriebenen Versuchstechnik. Die Anregung der Überspannungen erfolgte dabei durch Leitungswellen, die vom Generator eines Netzmodells geliefert wurden [16].

Die Spannungskurven an verschiedenen Punkten der Anlage wurden os-

zillographiert. In Figur 6 sind zwei der so gemessenen Kurven den berechneten Kurven gegenübergestellt. Unter den Diagrammen sind der Schaltzustand der Anlage und die Wellenform des Anregungsimpulses eingezeichnet.

#### 3.2 Berechnung der Überspannungen

Für die Beurteilung des Überspannungsschutzes berechnete man die Überspannungen aus den Blitzströ-

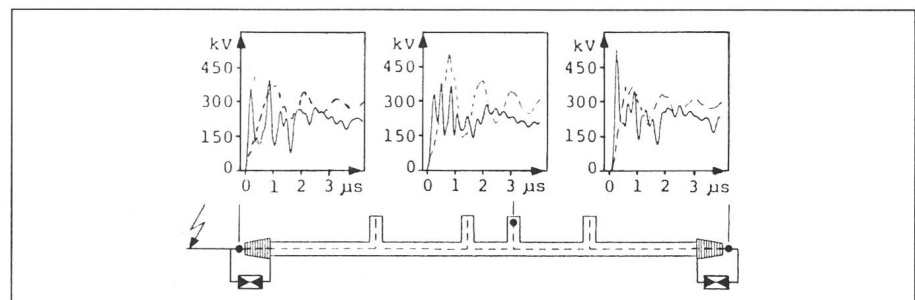
men, zusammen mit allen Vorgängen an der Freileitung. Man simulierte dafür die Anlage und einige Spannungsfelder der Freileitung (Fig. 7) und berechnete die Zeiten der Überschläge an den Isolatoren anhand der Stoskennlinien.

Die Freileitung ist an eine gekapselte Schaltanlage angeschlossen, wobei die Sammelschiene zwischen den Abgängen fast 100 m lang ist. Untersucht wurde das Verhalten bei drei verschiedenen Schaltzuständen (Fig. 8, 9, 10). Wie sich zeigte, sind direkte Blitzschläge in die Leiterseile wenig wahrscheinlich, da die Freileitung mit drei Blitzschutzerdseilen ausgerüstet ist. Auch rückwärtige Überschläge zu den Leiterseilen sind praktisch unmöglich, da die Erdungswiderstände der Masten sehr klein sind. Trotzdem wurden entsprechende Berechnungen vorgenommen.

Als Ursache der Überspannungen wurden einerseits direkte Blitzschläge in Leiterseile (Anregung durch Blitzstrom) und andererseits am Stationseingang eintreffende Wellen (Anregung durch Leitungswelle) angenommen. Die Resultate beider Rechnungen werden im folgenden miteinander verglichen. Die Scheitelspannung der Leitungswelle wurde so gewählt, dass alle Überspannungen vergleichbare Scheitelwerte erreichen. Es ergaben sich damit folgende Daten für die beiden Anregungsarten:

#### Anregung durch Blitzstrom (ausgezogene Kurven)

Annahme: Blitzschlag in ein Leiterseil (Fig. 7) beim zweiten Leitungsmast, 240 m vor dem Endverschluss der Anlage bzw. des Kabels, bei einem Blitzstrom von 50 kA Scheitel und 1 μs Anstiegsdauer (z.B. bei der zweiten Entladung in einem negativen Wolke-Erde-Blitz).



**Fig. 8** Berechnete Überspannungen an der Anlage Heilbronn

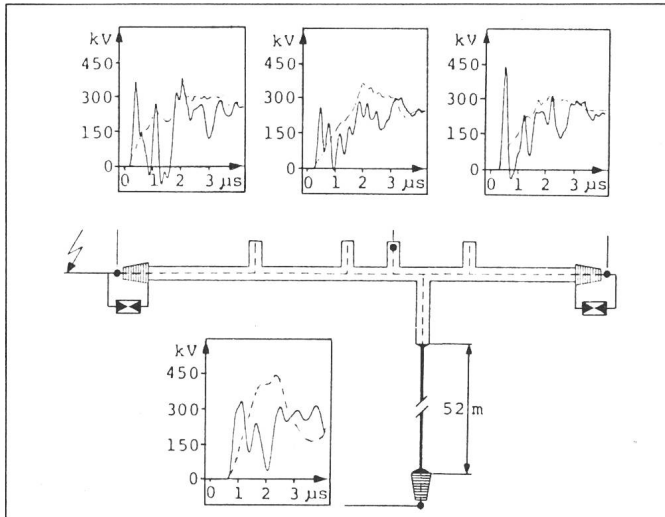
Die Freileitung ist direkt in die Anlage eingeführt. Ein weiterer Abgang ist angeschlossen. Bei den Abgängen ist je 1 Ableiter eingebaut.

Anregung durch:

— eingepprägter Strom 50 kA/1 μs  
 - - - - - Leitungswellen 1,5 MV/1 μs

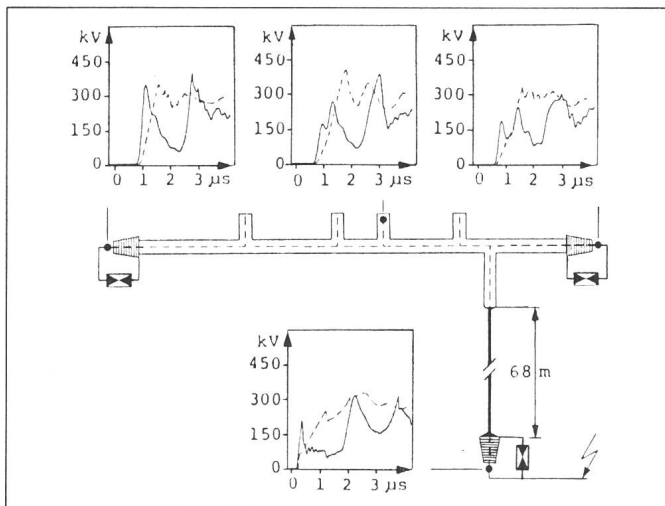
**Fig. 9**  
**Berechnete Überspannungen**

wie Figur 8, aber mit einem zusätzlichen, an die Sammelschiene angeschlossenen Kabel. Anregung wie Figur 8.



**Fig. 10**  
**Berechnete Überspannung**

wie Figur 8, aber Einführung der vom Blitz getroffenen Freileitung über ein Kabel mit einem dritten Überspannungsableiter beim freileitungsseitigen Kabelendverschluss. Anregung wie Figur 8.



### Anregung durch Leitungswelle (gestrichelte Kurven)

Annahme: Leitungswelle von 1,5 MV Scheitelspannung und 1  $\mu$ s Anstiegsdauer von der Freileitung zu einem Endverschluss der gekapselten Anlage oder eines Kabels.

Betrachtet wurden die *Schaltzustände*:

- Anlage ohne Kabel, geschützt durch zwei Überspannungsableiter (Fig. 8).
- Anlage mit einem Kabel, geschützt durch zwei Überspannungsableiter. Die vom Blitz getroffene Freileitung ist direkt in die Anlage hineingeführt (Fig. 9).
- Die vom Blitz getroffene Freileitung ist über ein Kabel in die Anlage eingeführt. Die Anlage ist durch drei Überspannungsableiter geschützt (Fig. 10).

### 3.3 Überspannungen bei verschiedenartiger Simulation der Blitzschläge

Beim Vergleich der berechneten Spannungskurven (Fig. 8, 9, 10) erkennt man, dass nur die physikalisch sinnvollere Anregung durch den eingepägten Blitzstrom verlässliche Resultate liefert. Durch Leitungswellen hervorgerufene Spannungskurven verlaufen völlig anders und vermitteln dadurch oft ein falsches Bild des Verhaltens der Anlage. Typisch sind folgende Unterschiede:

- Die ersten aus den Blitzströmen gerechneten Wellenfronten sind sehr steil. Sie können hohe, äusserst kurze Spannungsspitzen hervorrufen. Nach diesen Spitzen sinkt die Spannung in der Anlage. Sie bleibt danach tiefer als bei der Anregung durch eine einzelne Leitungswelle.

- Bei der Anregung durch eine Leitungswelle fließt von Anfang an ein relativ grosser Strom zur Anlage. Die Spannung steigt dadurch gleichmässig an und wird in der Mitte der Schiene um einiges höher als an den Enden mit den Überspannungsableitern.

Einzelne Teile der Anlage sind demnach besser geschützt, als aufgrund von Rechnungen mit Leitungswellenanregung anzunehmen wäre. Dies kann sich günstig auswirken, vor allem in der Mitte der Anlage, bei grossen Abständen vom nächsten Überspannungsableiter und an ungeschützten offenen Kabelenden.

### 3.4 Schutz der Anlage

An Spannungskurven, die aus den Blitzströmen berechnet wurden, erkennt man folgende Eigenheiten:

- Die Mitte der Anlage ist im allgemeinen gut geschützt. Die Überspannungen sind hier niedriger, als aufgrund von Rechnungen mit Leitungswellen zu erwarten wäre.
- Ist die vom Blitz getroffene Freileitung direkt mit der gekapselten Anlage verbunden, so ist die Scheitelspannung in der Mitte der Anlage oft tiefer als an den mit Ableitern geschützten SF<sub>6</sub>-Luft-Durchführungen.
- Wird ein relativ kurzes Kabel (z.B. ein direkt in einen Transformator eingeführtes Kabel) an die Sammelschiene angeschlossen, so sinken die Überspannungen an der ganzen gekapselten Anlage.
- Bei einer Kabelverbindung zwischen der vom Blitz getroffenen Freileitung und der gekapselten Anlage sind die Überspannungen in der Schaltanlage im allgemeinen etwas kleiner als bei einer direkten Verbindung zur Freileitung. Innerhalb der gekapselten Anlage werden hier überall ähnliche Scheitelwerte erreicht. Ähnlich gebaute Anlagen verhalten sich oft, aber nicht immer, gleichartig. Es muss deshalb von Fall zu Fall untersucht werden, wie eine Anlage am besten zu schützen ist.

## 4. Anwendungen auf andere Problemkreise

Da sich das Programm SPREDIS bei der Berechnung der Blitzüberspannungen gut bewährt hat, wurde es auch zur Lösung von anderen Aufgaben eingesetzt. Im folgenden seien einige Anwendungen beschrieben.

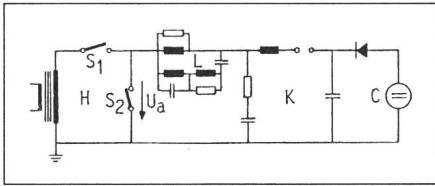


Fig. 11 Prüfkreis zur Simulation eines Abstandscurzschlusses bei der Schalterprüfung

- $U_a$  Spannung an Schalterprüfling
- H Hochstromkreis
- K Hochspannungsschwingkreis
- L künstliche Leitung
- C Ladekreis
- $S_1$  Hilfsschalter
- $S_2$  Prüfling

#### 4.1 Wiederkehrende Spannung bei der synthetischen Schalterprüfung

Bei der Entwicklung moderner SF<sub>6</sub>-Schalter ist das Verhalten der Prüfkreise von entscheidender Bedeutung. Der erste Entscheid über den Erfolg einer Ausschaltung erfolgt in solchen Schaltern unmittelbar nach der Stromunterbrechung in einem Bereich von etwa 0,1  $\mu$ s Dauer. In diesem Bereich muss man den Verlauf der wiederkehrenden Spannung an der Schaltstrecke genauso gut kennen wie beim anschließenden Anstieg auf hohe Scheitelwerte.

Bei der Schalterprüfung wird diese wiederkehrende Spannung meist durch einen Prüfkreis (Fig. 11) erzeugt. Ihre Messung ist schwierig, da bei den Versuchen grosse Leistungen umgesetzt werden. Zusätzliche Berechnungen des Verlaufs der wiederkehrenden Spannung und der übrigen Strom- und Spannungskurven liefern deshalb wertvolle Zusatzinformationen und erleichtern die Dimensionierung des Prüfkreises.

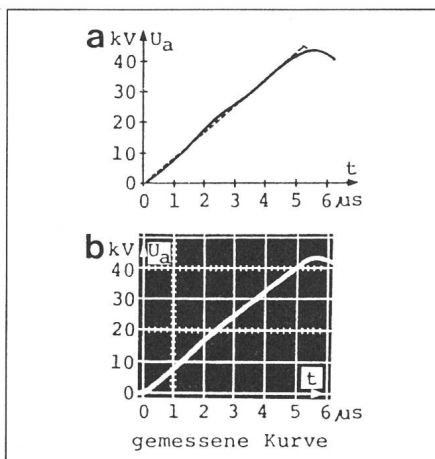


Fig. 12 Vergleich der gemessenen und der berechneten wiederkehrenden Prüfspannung  $U_a$

- a ————— berechnete Kurve
- Sollkurve nach IEC-Publ. 56-2
- b ..... gemessene Kurve

Solche Rechnungen wurden mit dem Programm SPREDIS durchgeführt. Das an sich einfache Ersatzschema in der Fig. 11 wurde dafür durch Einfügen der Hilfskreise, Verbindungsleitungen und Streukapazitäten erweitert. Das vollständige System besteht aus 79 Wellenleitern und 59 Knotenbereichen. Der berechnete Verlauf der wiederkehrenden Spannung  $U_a$  entspricht der Kurve in Fig. 12a.

Neue Prüfkreise werden bevorzugt anhand solcher Rechnungen dimensioniert, da sich so sehr rasch ein regelkonformer Verlauf der wiederkehrenden Spannung erzielen lässt. Berechnete und gemessene Spannungskurven werden in Fig. 12 miteinander verglichen.

#### 4.2 Kontaktprellen

Bei der Entwicklung eines Schalters wurde die Bewegung der Kontakte unter Berücksichtigung des Prellens bei der Kontaktgabe berechnet. Alle Stöße wurden dabei berücksichtigt. Aufgrund der Rechnung konnte eine gute prellfreie Kontaktgabe erzielt werden.

Für die Rechnung wurden die Kontakte und die Kontaktträger in stangenförmige Teilelemente zerlegt. Von jedem dieser Elemente wurde die Masse  $m$  und die Federkonstante  $c$  ermittelt. Mit den bekannten Analogien zu den elektrischen Grössen ergeben sich als Eingabedaten die Wellenlaufzeit  $T$  und der Wellenwiderstand  $Z_w$

$$T = \sqrt{m/c} \quad (4)$$

$$Z_w = 1/\sqrt{mc} \quad (5)$$

Rechengrössen waren die Geschwindigkeiten  $v$  (anstelle der Spannungen  $u$ ) und die Kräfte  $F$  (anstelle der Ströme  $i$ ).

Das Schema des Systems und die Werte der Konstanten findet man in der Fig. 13. Es wurden folgende Zustände programmiert:

- Zustand mit getrennten Kontaktflächen. Die Bewegungen der Kontakte sind voneinander unabhängig.
- Zustand bei Kontaktberührung. Die Kontakte hängen zusammen und bewegen sich gemeinsam.

Der Übergang zum zweiten Zustand wird automatisch ausgelöst, sobald der Kontaktabstand gleich Null wird. Die Kontakte bleiben darauf verbunden, bis die Druckkraft an der Kontaktfläche negativ wird. Der Zustand mit getrennten Kontakten wird darauf wieder hergestellt.

Ein Berechnungsbeispiel zeigt Fig. 14, wobei in der Mitte der ganze Vorgang und rechts im gedehnten Massstab eine kurze Periode nach der ersten Kontaktberührung aufgezeichnet wurde. Wie man sieht, prellen die Kontakte leicht. Man beachte:

- Zwischen dem Anfangszustand und dem Endzustand liegen total 33 Zustandswechsel. In der obersten Kurve in der Fig. 14 erkennt man die Kraftimpulse während der Perioden mit Kontaktberührung.
- Die Kontakte trennen sich mehrmals während je etwa 1  $\mu$ s Dauer. Sie erreichen dabei anfangs einen Abstand von 0,34 mm. In den folgenden Perioden werden die Abstände kleiner, bis die Kontakte schliesslich dauernd geschlossen bleiben.

Schema	mechanische Daten		Wellendaten	
	Masse $m$ (kg)	Federkonstante $c$ (MN/m)	Laufzeit $T$ ( $\mu$ s)	Wellenwiderstand $Z_w$ (S/kg)
	0,0645	2,684	155,0	$2,403 \times 10^{-3}$
	0,0340	12,8	55,0	$1,421 \times 10^{-3}$
	0,0340	340,0	10,0	$0,294 \times 10^{-3}$
	0,0340	340,0	10,0	$0,294 \times 10^{-3}$
	0,0140	35,2	20,0	$1,421 \times 10^{-3}$
	0,0720	0,0125	2400,0	$33,333 \times 10^{-3}$

Fig. 13 Schema und Wellendaten eines Kontaktpaares zur Berechnung des Bewegungsvorgangs

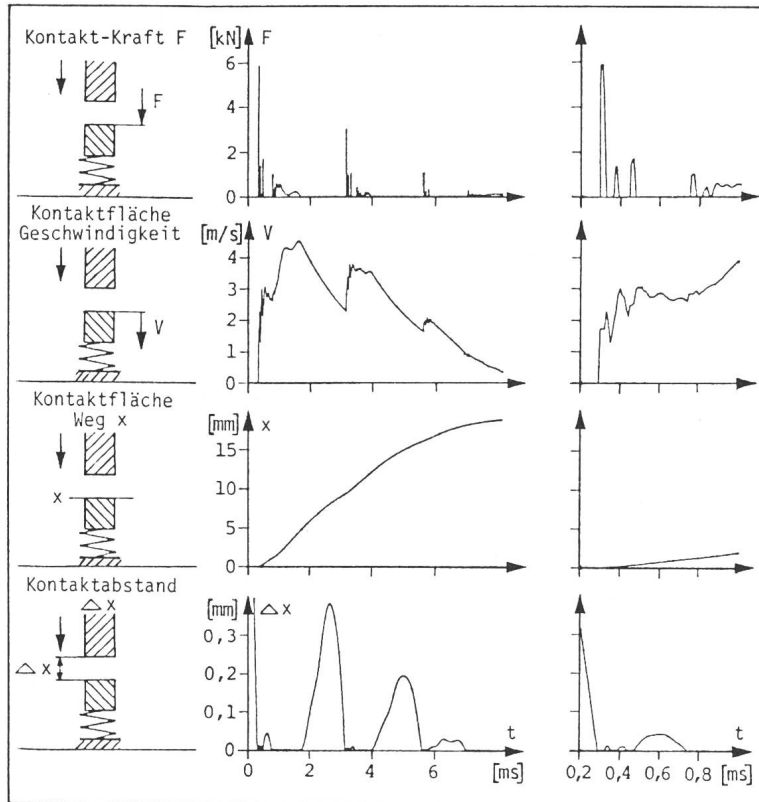


Fig. 14 Gerechneter Bewegungsvorgang von prellenden Kontakten

links Definition des Variablen

Mitte gesamter Zeitverlauf

rechts Zeitverlauf gedehnt

- Auf jeden Aufprall folgen einige Schläge, in denen sich die Kontakte um einige Mikrometer trennen. Sie stammen von den mechanischen Druckwellen, die sich nach dem ersten Aufprall in den Kontaktträgern ausbreiten.

Diese Rechenergebnisse wurden durch Messungen bestätigt.

## 5. Schlussfolgerungen

Zur Berechnung der Blitzüberspannungen an SF<sub>6</sub>-isolierten gekapselten Schaltanlagen muss die vom Blitz getroffene Freileitung exakt simuliert werden. Zu berücksichtigen sind dabei vor allem der Verlauf des Blitzstromes, der Einschlagspunkt des Blitzes und

die Art der Störung sowie Überschläge an der Freileitung.

Das Programm SPREDIS ermöglicht eine einfache und problemlose Berechnung solcher Überspannungen. Es eignet sich daneben auch zur Berechnung von anderen transienten Vorgängen an elektrischen Kreisen wie z.B. Spannungen und Strömen an Prüfkreisen sowie Schaltüberspannungen. Aufgrund der Analogien zwischen mechanischen und elektrischen Systemen eignet sich das Programm auch zur Berechnung mechanischer Bewegungsvorgänge. Weitere Anwendungen sind in Arbeit, z.B. Berechnungen von Bewegungsvorgängen an Kurbeltrieben mit nichtlinearen Übersetzungen.

Das Programm ist sehr stabil und kann unetstetige Änderungen einfach verarbeiten. Die Gefahr eines Divergierens der Werte ist äusserst klein. Weitere Vorteile sind:

- Relativ kurze Rechenzeiten,
- Praktisch unbeschränkte Grösse der berechenbaren Systeme,
- Vielseitige Möglichkeiten zur Anpassung an spezielle Problemstellungen,
- Möglichkeit einer Erweiterung durch vom Anwender erstellte Subroutinen.

## Literatur

- [1] H. W. Dommel: Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks. IEEE Trans. PAS 88(1969)4, p. 388...399.
- [2] P. Althammer: Die digitale Berechnung von Ausgleichsvorgängen in elektrischen Netzwerken unter besonderer Berücksichtigung komplizierter Randschaltungen. Bull. SEV 54(1963)19, S. 789...795.
- [3] I. Johansen and J. Huse: Digital calculation of lightning surge voltages in high-voltage transmission systems. Proc. IEE 112(1965)10, p. 1933...1941.
- [4] G. Catenacci: Le calcul des chocs de manœuvre. II: Représentation du réseau pour les études de mise sous tension et de remise sous tension de lignes alimentées par une source inductive. Electra -(1974)32, p. 17...42.
- [5] H. Röhler und A. Strnad: Der Blitzschlag im Nahbereich von Hochspannungsschaltanlagen. Elektrizitätswirtschaft. 80(1981)10, S. 311...316.
- [6] J. Vontobel: Vergleich der Isoliereigenschaften von Hochspannungsschaltanlagen. E und M 93(1976)10, S. 426...430.
- [7] W. Boeck und W. Taschner: Isolationsverhalten SF<sub>6</sub>-isolierter koaxialer Zylinderanordnungen bei Stossspannungsbeanspruchung. ETZ-A 97(1976)6, S. 335...340.
- [8] P. J. Robinson e.a.: Protection contre les surtensions de foudre du poste à 550 kV d'Itaipu à isolation gazeuse au SF<sub>6</sub>. Rapport CIGRE No. 33-11, 1982.
- [9] D. S. Jones: Generalized Functions. London a.o., McGraw-Hill, 1966.
- [10] L. Schwartz: Théorie des distributions. Seconde édition. Paris, Hermann, 1966.
- [11] H. V. Stephanides: Vereinfachte Berechnung von Einschwing- und Regelvorgängen mit unetstetig einsetzenden Funktionen. Revue Roumaine des Sciences Techniques, Série Electrotechnique et Energétique 19(1974)1, p. 63...91.
- [12] W. Klein: Grundlagen der Theorie elektrischer Schaltungen. Berlin, Springer-Verlag, 1961.
- [13] R. G. Wasley and S. Selvaivanayagamoorthy: Forward and backward response functions for transmission line transient analysis. IEEE Trans. PAS 93(1974)2, p. 685...692.
- [14] H. V. Stephanides und M. Schmid: Überspannungen bei Blitzschlägen an Kabeln mit ausgekreuzten Mänteln. Bull. SEV 63(1972)3, S. 125...134.
- [15] H. V. Stephanides und E. Eichenberger: Überspannungen an Generatoren in Blockschtaltung und Massnahmen zur ihrer Begrenzung. Bull. SEV 61(1970)1, S. 2...7.
- [16] H. Stephanides: Lösung von Überspannungsschutzproblemen durch Anlagemodelle. Bull. SEV 55(1964)6, S. 256...260.