

# Prüfung von Hochspannungsleistungsschaltern

Autor(en): **Fröhlich, K.**

Objektyp: **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): **78 (1987)**

Heft 9

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-903856>

## **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.

# Prüfung von Hochspannungsleistungsschaltern

K. Fröhlich

*Bei der Prüfung des elektrischen Schaltvermögens von Hochspannungsleistungsschaltern ist die experimentelle Simulation von Schaltungen extrem hoher Leistung das zentrale Problem. Ständig steigenden Anforderungen angepasst, wurde ein modularer synthetischer Prüfkreis für höchste Leistung aufgebaut und erprobt. Modernste Hilfsmittel der Elektronik sowie fundierte physikalische Kenntnisse über den Schaltprozess sind für die Prüfkreisentwicklung eine Notwendigkeit.*

*Pour les essais du pouvoir électrique de coupure de disjoncteurs de puissance à haute tension, la simulation expérimentale de coupures d'une puissance extrêmement élevée est essentielle. Adapté aux exigences de plus en plus sévères, un circuit synthétique modulaire d'essais a été développé et éprouvé, en faisant appel à des moyens électroniques sophistiqués ainsi qu'à une connaissance approfondie du processus physique de coupure.*

Der Aufsatz ist eine gekürzte Fassung des Vortrages vom 1. Juli 1986 im Rahmen des Kolloquiums «Aktuelle Probleme der Energietechnik» an der ETHZ.

## Adresse des Autors

Klaus J. Fröhlich, Dr. dipl. Ing., Leiter des Hochspannungslabors für Entwicklungsversuche an Komponenten der elektrischen Energieverteilung, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie, Abt. ATX-S, 8050 Zürich-Oerlikon.

## 1. Einleitung

Hochspannungsleistungs-Schalter sind zentrale Elemente in jedem Hoch- und Mittelspannungsnetz der elektrischen Energieübertragung und -verteilung. Ihre Aufgabe ist neben dem Schalten von Betriebsströmen auch das Unterbrechen und Einschalten von Kurzschlussströmen im Fehlerfall (bis zu einigen 10 KA und mehr). Eine bis mehrere in Reihe geschalteten Unterbrechungsstellen erfüllen diese Aufgabe.

Basis für die Entwicklung von solchen Schaltern ist heutzutage nicht nur ausgereiftes elektrotechnisches und maschinenbauliches Können; vielmehr ist auch die genaue Kenntnis der physikalischen Vorgänge beim Schaltvorgang mit einer oftmals komplexen Wechselwirkung zwischen Schalter und Netz unerlässlich. Dementsprechend hoch ist heute das technische Niveau von modernen Hochspannungsleistungsschaltern. Auf dieser Grundlage ist das erreichbare Schaltvermögen der einzelnen Unterbrechungsstellen eines Schalters ständig im Ansteigen. Weniger Unterbrechungsstellen und damit kleinere Schalter mit höherer Zuverlässigkeit sind das Ergebnis.

Mit dieser Entwicklung hat selbstverständlich auch die Schalterprüftechnik Schritt zu halten. Höhere Prüfleistungen sind bereitzustellen, und die Schalterprüfmethodik muss ständig dem aktuellen Wissensstand über die Schalterbeanspruchung im Netz angepasst werden. In Anbetracht des hohen Investitionsaufwands für entsprechende Prüfeinrichtungen ist das eine stete Herausforderung für den Prüfeingenieur. Computersimulation von Schalter und Netz, moderne Mess-, Steuer- und Anlagentechnik sowie ein detailliertes physikalisches Grundlagenverständnis sind dabei nicht mehr wegzudenkende Werkzeuge.

Die Schalterprüfung wurde damit zu einem interdisziplinären Wissensgebiet von grosser Breite. Kenntnisse über Hochspannungs- und Hochstromtechnik, Netztechnik, Elektronik und Datentechnik und nicht zuletzt auch über Maschinenbau sind gleichermaßen erforderlich.

Der folgende Aufsatz soll einen groben Überblick darüber geben, welcher Mannigfaltigkeit von Prüfungen ein Schalter zu unterziehen ist, welche Probleme dabei auftreten und welche Lösungswege vorhanden sind

## 2. Arten der Schalterprüfung

Es werden zwei prinzipielle Arten von Prüfung unterschieden:

- Typenprüfung: Sie dient als endgültiger Funktionsnachweis für den Schalteranwender und erfolgt nach den einschlägigen Vorschriften (z.B. IEC, ANSI usw.).
- Entwicklungsprüfung: Sie zeigt dem Hersteller die Grenzbelastbarkeit des Gerätes und liefert Parameter für rechnerische Extra- oder Interpolation. Eine genaue Einhaltung der Vorschrift ist nicht erforderlich, solange der Versuch ausreichend Aufschluss über das Verhalten des Gerätes unter Standardbedingungen erlaubt.

Jeder Schalter hat folgende vier Grundfunktionen zu erfüllen:

- 1 Führen des Stromes im geschlossenen Zustand
- 2 Isolieren über der Schaltstrecke im offenen Zustand und gegen Erde
- 3 Einschalten (möglichst rascher Übergang von 2 nach 1)
- 4 Ausschalten (möglichst rascher Übergang von 1 nach 2).

Dementsprechend besteht ein Schalter aus folgenden drei Funktionseinheiten: mechanisches Antriebssystem,

Funktionseinheit	zu prüfende Funktion	zu simulierende Grösse	erforderliche Einrichtung	erforderliche Quellenleistung
Mechanik	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Bewegung</li> <li>● Kraft/Dehnung/Bruchverhalten</li> <li>● Schwingungs-/Resonanzverhalten</li> <li>● Dichtigkeit</li> <li>● Klimaverhalten</li> <li>● Schallspektrum</li> <li>● Erdbebenfestigkeit</li> <li>● Dauerverhalten</li> </ul>	Klima  Erdbeben  Umbruchskraft	Mechaniklabor  Rütteltisch  Klimakammer  Messtechnik	etwa 50 kW
Isolation	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Blitzstoss</li> <li>● Schaltstoss</li> <li>● Wechselfspannung</li> <li>● Chopped Wave</li> <li>● Teilentladung</li> </ul>	hohe Spannung,  kleiner Strom	Hochspannungslabor	1...2 MW
Strombahn	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Stromtragverhalten                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kurzschlussfestigkeit</li> <li>- Dauerstrom (Erwärmung)</li> </ul> </li> </ul>	hoher Strom,  kleine Spannung	Hochstromlabor	einige MW
Unterbrechungsstelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ein- und Ausschaltverhalten von:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Klemmenkurzschluss</li> <li>- Abstandskurzschluss</li> <li>- kapazitiven Strömen</li> <li>- kleinen induktiven Strömen</li> <li>- Lastströmen</li> <li>- Phasenopposition</li> </ul> </li> </ul>	hoher Strom <i>und</i> hohe Spannung	Hochleistungslabor	bis zu 60 GVA

Tabelle I Prüfungen an den Funktionseinheiten eines Schalters

Isolationssystem sowie Strombahn und Unterbrechungsstelle. Das richtige Funktionieren dieser Einheiten ist in einer langen Reihe verschiedenster Prüfungen zu bestätigen. Tabelle I gibt einen Überblick darüber.

All diese Prüfungsarten im Detail zu behandeln würde bei weitem den Rahmen dieses Aufsatzes sprengen. Im weiteren wird daher nur auf die Schaltprüfung eingegangen und hier wiederum als typisches Beispiel nur auf die

Simulation des Klemmenkurzschlusses. Ein Schaltversuch, und insbesondere eine Kurzschlussimulation, erfordert eine extrem hohe Prüfleistung. Der prüftechnische Aufwand und die Investitionskosten für eine entsprechende Laboranlage sind mit Abstand am grössten. Beides stellt für den Schalterhersteller ein zentrales Problem dar.

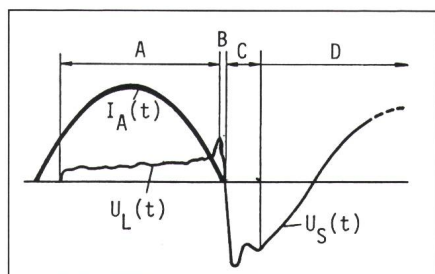
### 3. Physikalische Grundlage eines Abschaltvorganges

Zum besseren Verständnis der nachstehend erläuterten Prüfmethode seien die grundlegenden Vorgänge im Schalter kurz zusammengefasst [1; 2]. Eine Wechselstromunterbrechung läuft in vier Phasen ab (Fig. 1), die durch unterschiedliche physikalische Phänomene geprägt sind; nämlich die Hochstromphase (A), die thermische Phase (B), die Phase der dielektrischen Wiederverfestigung (C) und die dielektrische stationäre Phase (D).

Die Hochstromphase beginnt mit Trennung der Schaltkontakte und endet etwa einige 10...100 µs vor dem Stromnulldurchgang. Sie wird abgelöst von der sogenannten thermischen Phase, die bis einige 10...100 µs nach

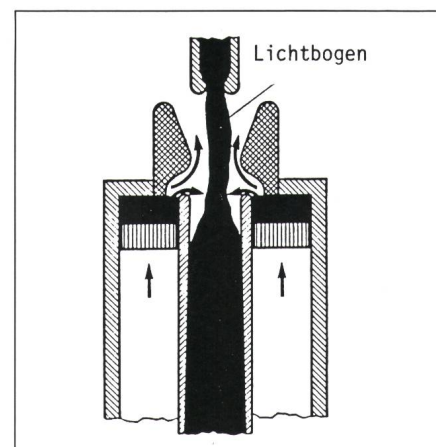
Stromnull dauert. Darauf folgt eine Phase der dielektrischen Wiederverfestigung bis etwa 100...200 µs nach Stromnull, gefolgt von der dielektrisch stationären Phase.

In der Hochstromphase A wird nach Kontakttrennung in einem Düsen-system ein Lichtbogen zwischen den beiden Kontakten gezogen, wie das am Beispiel eines SF<sub>6</sub>-Blaskolbenschalters in Fig. 2 schematisch dargestellt ist. Der Bogen wird in der Regel mit Über-

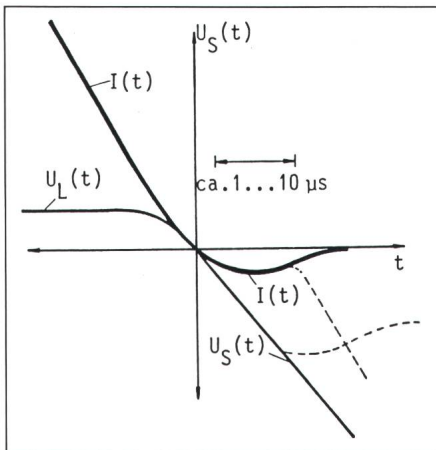


Figur 1 Schematisches Oszillogramm einer Wechselstromunterbrechung

- A Hochstromphase
- B thermische Phase
- C dielektrische transiente Phase
- D dielektrische stationäre Phase
- $I_A(t)$  Prüfstrom
- $U_L(t)$  Spannung des Schaltlichtbogens
- $U_S(t)$  Wiederkehrspannung über dem Schalter



Figur 2 Prinzip eines SF<sub>6</sub>-Blaskolbenschalters



**Figur 3** Stromverlauf  $I(t)$  und Spannungsverlauf  $U_S(t)$  um den Stromnulldurchgang im bzw. über dem Schalter

$U_L(t)$  Spannung des Lichtbogens  
 — Löschung  
 - - - - - thermische Wiederzündung

schallgeschwindigkeit vom Löschmittel des Schalters beblasen und gekühlt. Gegen den Stromnulldurchgang wird der Lichtbogendurchmesser immer kleiner (Übergang zu Phase B). Die dem Bogen vom Netz im Zeitintervall  $T$  zugeführte Energie (= Lichtbogen-spannung  $U_L(t) \times$  Strom  $I(t) \times T$ ), wird mit abnehmender Stromstärke verringert. Die Kühlung durch den Schalter bleibt jedoch erhalten. Im Stromnulldurchgang ist wegen  $I(t) = 0$  die zugeführte Energie null. Die Bogensäule hat jedoch eine gewisse thermische Trägheit mit einer Zeitkonstante von  $0,5... \sim 10 \mu s$ , je nach Löschmedium. Sie ist daher noch heiss und besitzt eine bestimmte Restleitfähigkeit. Unmittelbar nach dem Nulldurchgang beginnt über der noch gering leitenden Schaltstrecke die wiederkehrende Spannung anzusteigen. Diese erzwingt einen Reststrom von etwa  $0,5 A$  bis einige  $10 A$  und damit erneute Energiezufuhr in die Restgassäule (Fig. 3).

Ist die zugeführte Energie grösser als die vom Schalter durch Kühlung abgeführte Energie, dann steigt die Temperatur der Säule, und ihre Leitfähigkeit wird stark nichtlinear erhöht. Eine weitere Stromhalbwelle fließt als Folge durch den Schalter. Dieser Fall wird *thermische Wiederzündung* eines Schalters genannt. Ist die zugeführte Energie kleiner, so geht der Reststrom gegen null (Übergang zu Phase C). Die Bogensäule verliert trotz ansteigender Spannung ihre Leitfähigkeit, und das abkühlende Löschmedium geht in den isolierenden Zustand über (Phase C). Dieser Vorgang dauert je nach Medi-

um und Strömungseigenschaften des Düsensystems einige  $100 \mu s$ . Er wird als dielektrische Wiederverfestigung bezeichnet. Dabei findet ein Wettlauf zwischen der Wiederverfestigung des Schalters und der ansteigenden Spannung statt. Bricht die Schaltstrecke dielektrisch wieder durch, so wird von einer *dielektrischen Wiederzündung* gesprochen. Ist hingegen die Wiederverfestigung schneller, so war die Stromunterbrechung erfolgreich, und es folgt die dielektrisch stationäre Phase (D). In dieser Phase ist das Löschmittel erkaltet und voll isolierend. Wesentliche Belastungsgrößen in den einzelnen Phasen sind auf Grund der oben genannten physikalischen Verhältnisse:

- Phase A Der Wert des Hochstromes  $\rightarrow$  bestimmt die zugeführte Lichtbogenenergie.
- Phase B Stromsteilheit  $di/dt$  und Anfangssteilheit  $du/dt$  der transienten Wiederkehrspannung  $\rightarrow$  bestimmen das thermische Verhalten.
- Phase C Die Steilheit  $du/dt$  und Scheitelwert  $U_p$  der transienten Wiederkehrspannung  $\rightarrow$  bestimmen die dielektrische Belastung der wiederverfestigenden Schaltstrecke.
- Phase D Die Amplitude der netzfrequenten Wiederkehrspannung  $\rightarrow$  belastet die erkaltete Schaltstrecke.

#### 4. Wahl der kritischen Belastungsgrößen

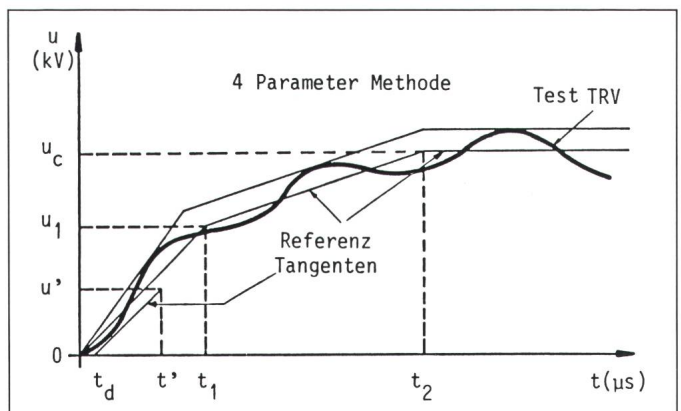
Die nationalen oder internationalen Vorschriften (z.B. IEC, ANSI) spezifizieren klar, wie die Parameter eines entsprechenden Prüfkreises für den jeweiligen Schaltfall zu wählen sind. Im Klemmenkurzschlussfall sind in erster Linie die Höhe des Prüfstroms und die Form der transienten Wiederkehr-

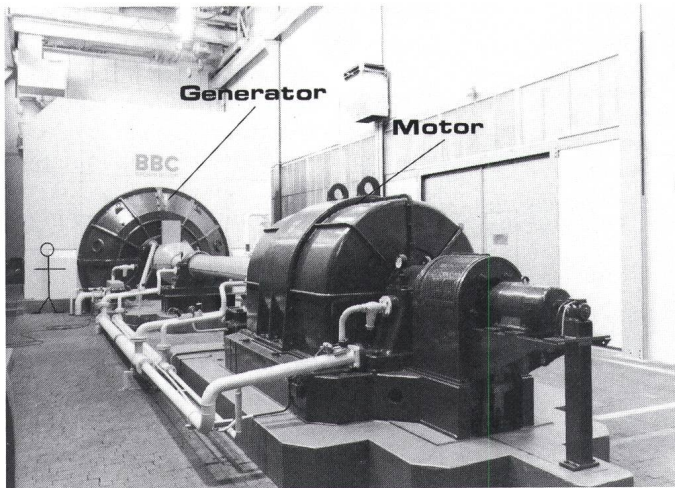
spannung (in Anlehnung an IEC im weiteren mit TRV, Transient Recovery Voltage, bezeichnet) ausschlaggebend. Scheitelwert und Steilheit der TRV sind in den Vorschriften so hoch bzw. so steil gewählt, dass die Vielfalt der in den verschiedenen Netzen auftretenden TRV-Formen für den Schalter in der Regel eine leichtere Beanspruchung darstellt als die Standard-TRV (Fig. 4). Bei einer Prüfung im Labor mit einem geeigneten Prüfkreis dürfen die Tangenten an die Test-TRV nicht unter den Referenztangente liegen. Diese Prüfung ist strenger als die Beanspruchung des Schalters im Netz, zumal bei der Standardprüfung Höchstwerte für Spannung und Strom anzulegen sind, während beide Höchstwerte im Netz praktisch nie gleichzeitig auftreten. Die Laborprüfung simuliert damit ein fiktives Netz, das wesentlich härter ist als die Vielfalt der in der Realität vorhandenen Netze.

#### 5. Direkte Simulation von Klemmenkurzschlussbedingungen

Für die Simulation kleinerer Schaltleistungen, insbesondere in der Mittelspannungsebene, reicht in der Regel die Leistung eines sog. «Direkten Prüfkreises». Strom und Spannung werden von ein und derselben elektrischen Quelle geliefert. Als Energiequelle wird üblicherweise ein Transformator an einem geeigneten Hochspannungsnetz oder ein Kurzschlussgenerator (Fig. 5) eingesetzt. In letzterem Fall dient der rotierende Rotor als Energiespeicher. Fig. 6a zeigt die einfachste Form eines solchen Kreises. Der entsprechende Strom- und Spannungsverlauf ist in Fig. 6b schematisch, der

**Figur 4** Spezifikation der zweifrequenten transienten Wiederkehrspannung durch Referenztangente (nach IEC)





**Figur 5**  
Kurzschlussgenerator  
(3,8 GVA) mit  
Antriebsmotor  
(2 MVA)

**6.1 Prüfmethodik**

Zwei Verfahren werden hauptsächlich zur Prüfleistungsreduktion angewandt:

- *Einphasige Prüfung*: Es wird nur einer der drei Pole, nämlich der am stärksten beanspruchte, geprüft. Dies ergibt eine Einsparung von etwa 50% bezogen auf die dreiphasige Prüfleistung.

- *Elementenprüfung*: Es wird nur eine der in Reihe geschalteten Unterbrechungsstellen geprüft. Diese Prüfung erfolgt stets einphasig. Die Leistungseinsparung gegenüber der dreiphasigen Vollprüfung ist:

$$P_{el} = a \cdot P_{voll} / 2n$$

( $n$  = Anzahl der Unterbrechungsstellen;  
 $a$  = Faktor, der Ungleichheiten in der Spannungsaufteilung zwischen den einzelnen Unterbrechungsstellen berücksichtigt;  
 $a = 1,02 \dots 1,1$ ).

**6.2 Synthetische Prüfschaltungen**

Die synthetische Prüfung ist heute international anerkannt und in den Gremien wie z.B. IEC [3] und ANSI [4] entsprechend berücksichtigt. Das Grundprinzip jeder synthetischen Prüfschaltung ist Aufgabenteilung. Die vier Phasen A, B, C, D des Schaltvorganges (Fig. 1) werden nicht wie

Einfachheit halber nur einphasig, dargestellt. Der Kreis besteht aus dem Kurzschlussgenerator (G), einem Schutzschalter (S), einem Draufschalter (D) und dem Versuchsobjekt (VS). Mit dem Motor (M) wird der Generator auf Nenndrehzahl gebracht. (VS) und (S) sind geschlossen, (D) ist offen. Die treibende Spannung des Kreises wird mit der Generatorerregung und der gewünschte Stromwert mit der Längsinduktivität ( $L$ ) eingestellt. Der Strom ist, wie bei einem Kurzschluss im Netz, praktisch rein induktiv.

Zu einem Zeitpunkt  $t_1$  wird D auf  $1/10\,000$  s genau geschlossen. Es fließt der Prüfkurzschlussstrom  $I_A(t)$  durch VS. Zu einem vorgewählten Zeitpunkt wird der Versuchsschalter VS so angesteuert, dass in  $t_2$  seine Kontakte öffnen. Nach der Stromunterbrechung erscheint über der Schaltstrecke, gedämpft schwingend, die transient wiederkehrende Quellenspannung  $U_S(t)$ . Frequenz und Dämpfungsfaktor der TRV werden durch die C- und R-Glieder eingestellt. Zur Anpassung an verschiedene Prüfspannungsebenen wird häufig noch ein Transformator, zur Vervielfachung der Quellenspannung, zwischengeschaltet.

Heute installierte Quellenleistungen sind in der Größenordnung zwischen 0,5...3,5 GVA. In einem Einzelfall sind 8 GVA bekannt.

**6. Synthetische Simulation des Klemmenkurzschlusses**

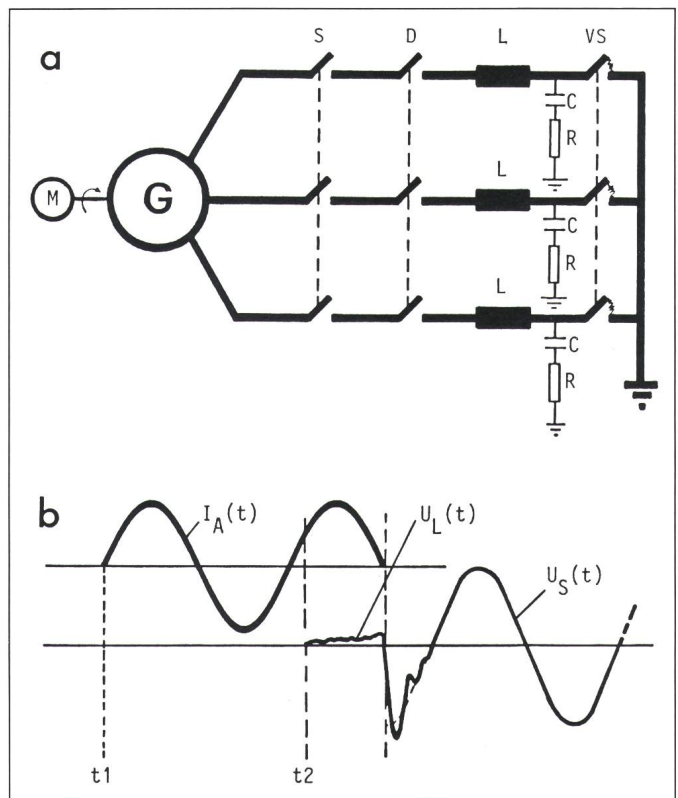
In modernen Hochspannungsnetzen werden heute Kurzschlussunterbrechungsleistungen bis zu einer Größenordnung von 55 GVA gefordert. (z.B.  $\sqrt{3} \times 380$  kV  $\times$  40 kA oder  $\sqrt{3} \times 550$  kV  $\times$  50 kA). Ohne astronomi-

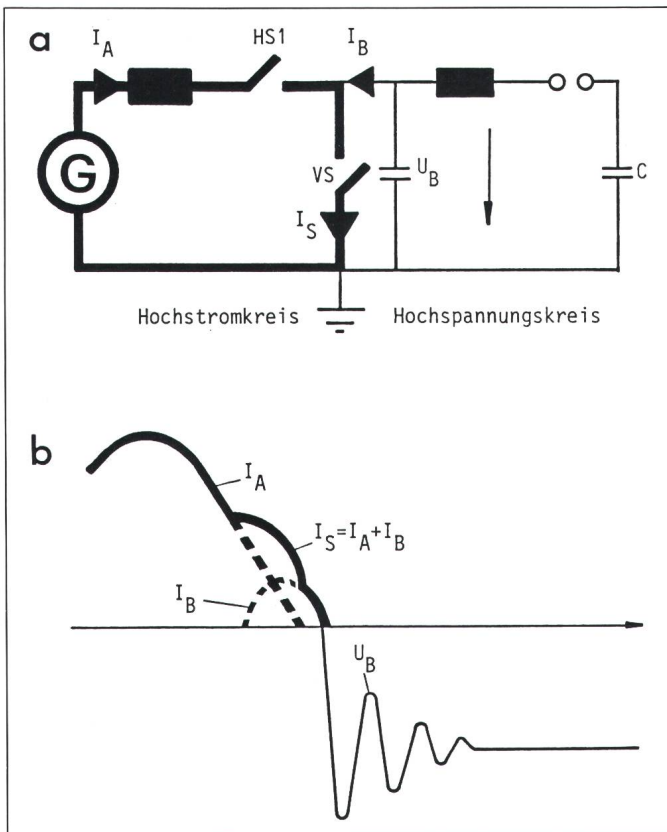
schen Kostenaufwand sind diese Werte mit einem Direktprüfkreis bei weitem nicht erreichbar. Schalter mit solcher Leistungsfähigkeit werden aber gebaut. Für eine entsprechende Prüfung sind seit Jahrzehnten zwei grundsätzliche Lösungsansätze unter dem Begriff «synthetische Prüfung» bekannt:

- Reduktion der aufzubringenden Prüfleistung durch ein geeignetes Prüfverfahren  $\rightarrow$  Prüfmethodik.
- Erhöhung der verfügbaren Direktprüfleistung durch synthetische Prüfkreise  $\rightarrow$  Prüfkreistechnik.
- Kombination aus beiden.

**Figur 6**  
Dreiphasiger  
Prüfkreis (a) und  
einphasiges  
schematisches  
Oszillogramm (b)

- M: Antriebsmotor
- D: Einschaltgerät
- S: Schutzschalter
- G: Kurzschlussgenerator
- VS: Versuchsschalter
- $I_A(t)$ : Prüfstrom
- $U_L(t)$ : Spannung des Schaltlichtbogens
- $U_S(t)$ : Wiederkehrspannung über dem Schalter





**Figur 7**  
Stromüberlagerungs-  
kreis (a) mit  
schematischen  
Strom- und  
Spannungs-  
verläufen (b)

HS1 Hilfsschalter  
VS Versuchsschalter

schaltprozesses, d.h. die Stromphase unmittelbar vor dem Nulldurchgang, und die wiederkehrende Spannung werden vom Hochspannungskreis simuliert. Der Hochstromkreis deckt also Phase A ab, der Hochspannungskreis Phase B, C, und D.

Bei der Spannungsüberlagerungsschaltung (Fig. 8) löschen HS1 und VS gleichzeitig. Phase B und der TRV-Anfang werden vom Hochstromkreis abgedeckt. Erst etwa im Scheitel der TRV des Hochstromkreises  $U_A(t)$  wird durch Zünden der Funkenstrecke FS der Hochspannungskreis überlagert und damit die gewünschte TRV produziert.

Beide Schaltungen haben Nachteile. Die Stromüberlagerung benötigt bei grosser Prüfleistung eine grosse, platzraubende Kondensatorbatterie im Hochspannungskreis. Bei der Spannungsüberlagerung ist die repräsentative Simulation der thermischen Phase international umstritten. Der Kreis ist jedoch bestens zur Simulation der dielektrischen Phase geeignet. Beide Schaltungen multiplizieren die einphasige Direktprüfleistung eines Labors etwa um den Faktor 5 bis 10.

beim Direktkreis durch eine, sondern durch zwei oder mehrere Funktionseinheiten des Prüfkreises in zeitlich richtiger Reihenfolge simuliert. Ein beträchtliches Mass an Leistungseinsparung für die Energiequellen dieser Einheiten wird damit erreicht.

gang des Hochstroms  $I_A$  im Versuchsschalter ein Schwingstrom  $I_B$  überlagert. Im Hilfsschalter HS1 fliesst nur  $I_A$ , so dass in diesem 200  $\mu$ s vor dem Versuchsschalter VS ein Stromnulldurchgang auftritt. Er löscht daher um dieses Zeitintervall früher als VS und trennt damit den Hochstromkreis vom Versuchsobjekt. Der Rest des Ab-

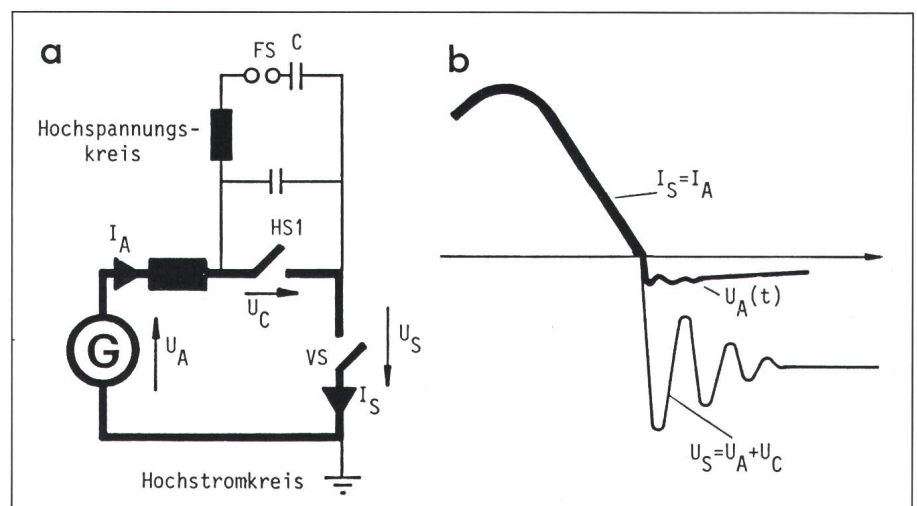
### Dreikreissynthetik

Seit etwa einem Jahrzehnt sind sog. Dreikreisschaltungen im Einsatz. Sie sind eine Kombination aus Strom- und Spannungsüberlagerung und vermeiden damit deren Nachteile. Neben dem Hochstromkreis für Phase A bestehen sie aus zwei Hochspannungs-

### Klassische Prüfschaltungen

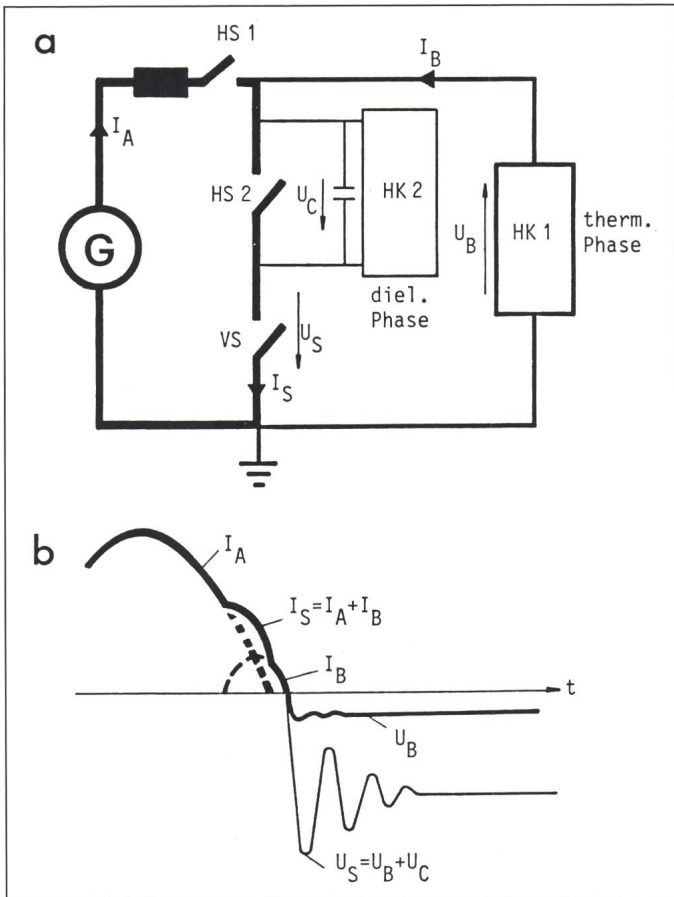
Seit längerer Zeit bekannt, und heute gemeinsam oder alternativ in nahezu allen grösseren Kurzschlusslaboratorien vorhanden, sind die sog. Strom- und Spannungsüberlagerungsschaltungen (z.B. [3; 5]). Beide Schaltungen bestehen aus einem Hochstromkreis (in der Regel der Direktkreis eines Kurzschlusslabors), der mit relativ geringer treibender Spannung 10...40 kV den Prüfstrom im Versuchsobjekt produziert, und einem Hochspannungskreis, der mit verhältnismässig kleiner Leistung nach der Stromunterbrechung die wiederkehrende Spannung über dem Versuchsschalter anlegt. Energiespeicher des Hochspannungskreises ist eine aufgeladene Kondensatorbatterie. Die Funktionsweise der beiden Kreise ist unterschiedlich.

Bei der Stromüberlagerung (Fig. 7) wird im Bereich um den Nulldurch-



**Figur 8** Spannungsüberlagerungskreise (a) mit schematischen Strom- und Spannungsverläufen (b)

HS1 Hilfsschalter VS Versuchsschalter FS Funkenstrecke



**Figur 9**  
Prinzipschema einer Dreikreis-synthetik (a) mit den entsprechenden Strom- und Spannungsverläufen (b)  
HS1, HS2: Hilfsschalter  
VS: Versuchsschalter  
HK1, HK2: Hochspannungskreise

Figur 11a zeigt das Schaltschema dieses Prüfkreises. Der Hochstrom  $I_A$  (Fig. 11b) wird vom Hochstromkreis (Modul A) mit dem Kurzschlussgenerator G an das Versuchsobjekt VS geliefert. Zum Zeitpunkt  $t_1$  wird die Funkenstrecke FS 1 getriggert und damit Modul B zugeschaltet. Nach dem Stromüberlagerungsprinzip wird in VS ein Schwingstrom  $I_B$  überlagert. Im Nulldurchgang von  $I_B$  (in  $t_3$ ) löscht VS sowie der Hilfsschalter HS2, der nur von  $I_B$  durchflossen war. Modul B ist aber über die Diode D1 noch immer ein galvanisch geschlossener Kreis, so dass ein eventuell auftretender Reststrom in umgekehrter Richtung ungehindert in VS fließen kann. Die Verhältnisse um den Stromnulldurchgang sind damit äquivalent zu einer reinen Stromüberlagerungsschaltung, und Phase B ist richtig nachgebildet. Bei den bekannten Dreikreis-schaltungen ist dies nicht zwangsläufig der Fall. Bestimmt durch die Elemente  $L_2$ ,  $C_2$ ,  $R_2$  wird über  $C_1$  und damit über VS der Anfang der transienten Wiederkehrspannung aufgebaut. In  $C_1$  und in D1 fließt dabei der Strom  $I_1$  (Fig. 11c). Einige  $\mu s$  nach dem Stromnulldurchgang in  $t_4$  wird die Funkenstrecke FS 2 getriggert, was den aus den Kondensatoren  $C_4$  bestehenden Marxschen Stoss-generator triggert. Er dient als Energiequelle für Modul C. Über die noch leitende Diode D1 sowie  $L_3$  und  $R_2$  beginnt ein Schwingstrom  $I_C$  zu fließen, der in D1 entgegengesetzt gerichtet ist, wodurch dort einige  $\mu s$  später in  $t_5$  Stromnulldurchgang auftritt. D1 sperrt, und Modul B ist damit unterbrochen (HS2 war ja bereits etliche  $\mu s$  offen). Die Kombination HS2 und D1 bildet also einen «Schalter», der

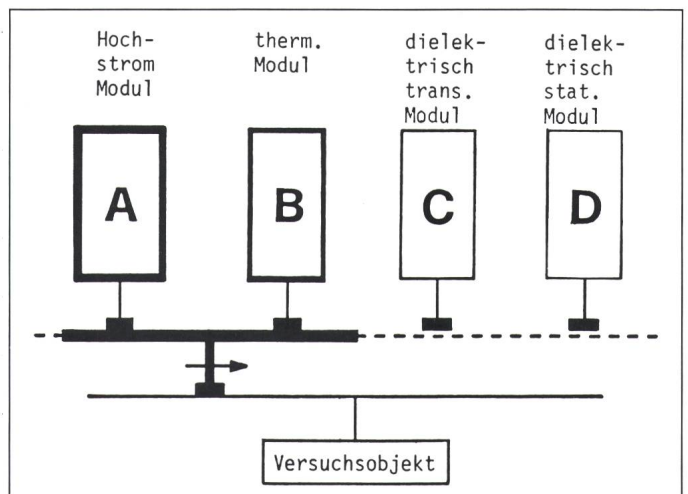
kreisen (Fig. 9). Ein Hochspannungskreis HK1 deckt dabei nach dem Stromüberlagerungsprinzip die thermische Phase B und den Anfang von Phase C ab. Der zweite Hochspannungskreis HK2 wird dem ersten (HK1) nach dem Spannungsüberlagerungsprinzip für Phase C und D überlagert. Der Vorteil dieser Methode gegenüber einer reinen Stromüberlagerung ist ein insgesamt geringerer Energieinhalt des Prüfkreises.

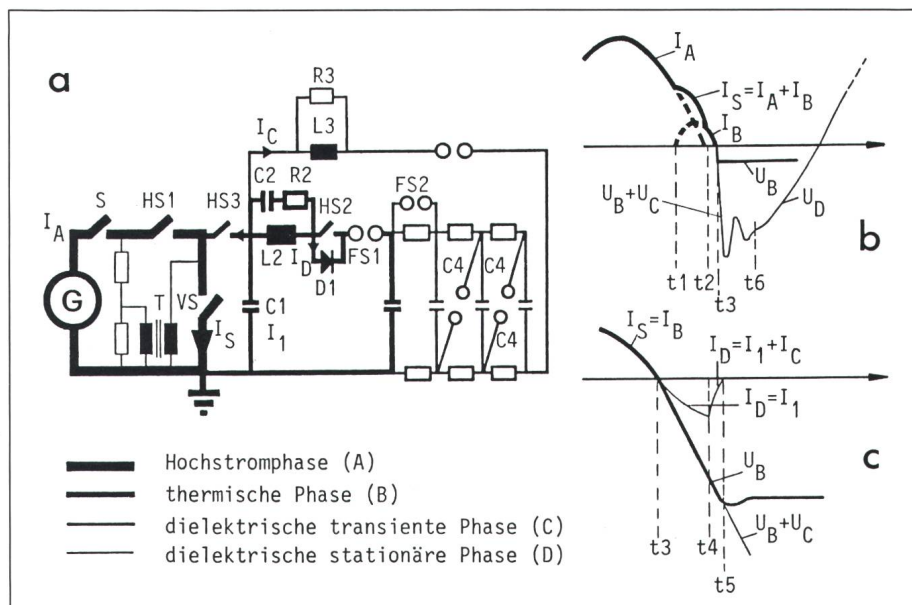
Das Grundprinzip ist aus Figur 10 ersichtlich. Jede der vier Phasen A, B, C, D des Schaltvorganges wird mit einem eigenen Kreismodul durch zeitlich richtiges Zu- und Wegschalten an das Versuchsobjekt simuliert. Jedes der Module ist nur auf eine einzige Funktion spezialisiert. Das bedeutet gesamthaft einen vergleichsweise geringen Energieinhalt, damit kleine Baugröße und grössere Flexibilität.

### Modulare Mehrkreissynthetik

Eine neue, hinsichtlich Funktionsaufteilung noch konsequentere Prüfschaltung wurde während der letzten drei Jahre im BBC-Kurzschlusslabor in Baden aufgebaut und erprobt. Dieser Kreis, als «Modulare Mehrkreissynthetik» benannt, vereinigt alle Vorteile der bekannten Schaltungen. Zudem entfallen deren Nachteile, wie z.B. zwei Hilfsschalter im Hochstromkreis oder ein komplexer Synchronschalter im Hochspannungskreis. Die Schaltung war bisher unveröffentlicht, daher wird im folgenden auf ihre Funktionsweise etwas näher eingegangen.

**Figur 10**  
Blockschema der modularen Mehrkreissynthetik





**Figur 11** Prinzipschema der Modularen Mehrkreissynthese (a) mit den Strom- und Spannungsverläufen (b)

HS1, HS2, HS3 Hilfsschalter VS Versuchsschalter FS1, FS2 triggerbare Funkenstrecken  
c Ausschnitt aus b

auch nach dem Stromnulldurchgang in  $t_2$  noch leitet, jedoch einige wenige  $\mu s$  später in  $t_5$  unterbricht. Dieser «Schalter» bedeutet einen wesentlichen Vorteil gegenüber allen bekannten Dreikreisschaltungen.

Der Strom  $I_C$  aus Modul C kommutiert in die Kapazität  $C_1$  und produziert in der Folge die TRV über VS. Ihre Form ist durch  $C_1, R_3, L_3$  einstellbar. Zum Zeitpunkt  $t_6$  öffnet HS 3. Der leistungsschwache Transformator T, gespeist durch G, wird wirksam und legt die netzfrequente Wiederkehrspannung über VS an (Phase D). Öffnen des Schalters S beendet den Vorgang nach gewünschter Dauer.

Vorteil dieser Schaltung ist, dass sie auf vergleichsweise kleinem Raum realisierbar ist. Kleinere Leistungslaboratorien mit einer Direktprüfleistung von nur etwa 1000...2000 MVA sind so in der Lage, Schalter höchster Leistung zu prüfen. Zudem schafft die

modulare Messkreissynthese hohe Flexibilität durch Kombination von nur zwei oder drei Modulen (z.B. A und B, oder A und C) für Entwicklungszwecke, wo es oftmals nicht nötig ist, exakt alle Phasen eines Schaltvorgangs nachzubilden. Prinzipiell ist die Methode auch für 3-Phasen-Anordnungen einsetzbar. Simulation von Abstandskurzschluss und Einschalten auf Kurzschluss ist ebenfalls durch geringe Modifikation der Schaltung möglich.

## 7. Schlussbetrachtung

Der Schalterprüfingenieur ist gezwungen, immer raffiniertere Lösungen zu suchen, um die steigenden Anforderungen in einem vertretbaren wirtschaftlichen Rahmen realisieren zu können. Das gilt nicht nur für die Klemmenkurzschlussprüfung. Auch für andere Schaltfälle gibt es entspre-

chende Entwicklungen synthetischer Prüfkreise, wie z.B. für kapazitives Schalten. Basis für all diese Entwicklungen ist heute der Einsatz modernster Hilfsmittel, wie

- Kenntnis der physikalischen Phänomene der Wechselstromunterbrechung
- digitale Simulation von Schaltlichtbogen, Prüfkreis und Netz.
- Einsatz von modernen Schaltelementen (triggerbare Funkenstrecke, Leistungshalbleiter, SF<sub>6</sub>-Schalter, Vakuumschalter, ZnO-Ableiter).
- digitale Steuer- und Messtechnik, die wegen der äusserst rauen Laborverhältnisse einen hohen Grad an elektromagnetischer Verträglichkeit aufweisen muss. Insbesondere die Messtechnik hat ein nicht alltägliches Anforderungsprofil, gekennzeichnet durch lange Registrierdauer (100...1000 ms) bei einer hohen Auflösung von  $\mu s$  und einer Messkanalzahl von 20 und mehr.
- moderner Sensorik zur Erfassung der verschiedensten physikalischen Grössen im und um das Versuchsobjekt.

Basierend auf diesen Werkzeugen sind heute synthetische Prüfmethode verfügbar, die eine netzgetreue Prüfung aller modernen Hochspannungsleistungsschalter ermöglichen.

## Literatur

- [1] C. Dunkel and R.P. Vogt: Latest developments in technology of the arc interruption and its application in MV and HV circuit breakers. New concept for HV switchgear installations. BBC-Publication No. CH-A 141-010-E. Baden, BBC AG, Brown Boveri & Cie., 1985.
- [2] K. Ragaller: Current interruption in high-voltage networks. - Browns Boveri symposium on current interruption in high-voltage networks, Baden/Switzerland, 1977 - New York/London, Plenum Press, 1978.
- [3] Rapport sur les essais synthétiques des disjoncteurs à courant alternatif à haute tension. Publication de la CEI 427, 1973.
- [4] IEEE guide for synthetic fault testing of AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical basis. ANSI/IEEE Standard C 37.081-1981.
- [5] E. Slamecka: Prüfung von Hochspannungsleistungsschaltern. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 1966.