

Die elektrische Festigkeit von Mehrfachunterbrechungen im Hochvakuum

Peter Sentker

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Hermann Kärner

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Lindmayer

Um die vielseitigen Vorteile der Vakuumschaltertechnologie für Spannungsebenen oberhalb von 36 kV verfügbar zu machen, sind technologische Maßnahmen erforderlich, die über einfache Geometrieänderungen bestehender Schaltröhren hinausgehen. Bisheriges Ausschlußkriterium für Hochspannungs-Vakuumschalter war die unzureichende Durchschlagspannung. Die Ursache hierfür ist die degressive Zunahme der Spannungsfestigkeit mit steigender Schlagweite. Während für Elektrodenabstände im Millimeterbereich die Spannungsfestigkeit des Vakuums gegenüber Konkurrenzmedien (hauptsächlich SF₆) überlegen ist, schwindet dieser Vorteil bei geforderten Blitzstoßspannungsfestigkeiten von mehr als 325 kV.

Der zunehmende gesellschaftliche und wirtschaftliche Druck auf Unternehmungen zur Produktion von umweltkonformen Produkten könnte in Zukunft den Einsatz von SF₆-Schaltern erschweren. Die Vakuumtechnologie ist durch die Abwesenheit eines Löschmediums ein prädestiniertes Lösungskonzept, das sich durch einfachste Entsorgung und das Fehlen toxischer Spaltprodukte auszeichnet.

Inhalt der Dissertation ist die Erhöhung der Blitzstoßspannungsfestigkeit im Vakuum durch Mehrfachunterbrechungen. Ausgehend von der hohen Spannungsfestigkeit bei kleinen Schlagweiten mit einem linearen Zusammenhang von Durchschlagspannung U_d und Schlagweite s soll durch die Reihenschaltung einzelner Schlagweiten die Spannungsfestigkeit gesteigert werden. Da die Reihenschaltung von derzeit vorhandenen Schaltröhren nur in Ausnahmefällen eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Lösung darstellt, war eine Zielvorgabe die Integration der Einzelschlagweiten in eine Vakuumumgebung. Kompakte Abmessungen, verminderte Antriebsenergien und niedrige Herstellungskosten sind die erwarteten Vorteile einer solchen Schaltröhre. Untersucht wurde, ob die theoretischen Verbesserungen gegenüber einer einfachunterbrechenden Anordnung in der Praxis erreicht werden können.

Bei der Spannungs-Schlagweiten-Charakteristik des Vakuums für Schlagweiten ab ca. 10 mm mit $U_d \sim s^a$ bestimmt der Exponent a zunächst entscheidend die Durchschlagspannung. Dominierende Einflußfaktoren auf die Durchschlagskennlinie sind der Schlagweitenbereich (abnehmendes a mit steigender Schlagweite) und der Durchmesser eines Dampfschirmes (abnehmendes a mit sinkendem Schirmdurchmesser). Daneben haben sekundäre Parameter, wie Elektrodenform, -typ und -material, einen Einfluß auf die Kennlinie.

Der theoretisch erreichbare Verbesserungsfaktor $V_n = U_{d,n}/U_{d,1}$ einer Mehrfachunterbrechung (definiert als Spannungssteigerungsfaktor einer n -fach-Unterbrechung gegenüber einer

Einfachunterbrechung mit gleicher Gesamtschlagweite) ist von folgenden Parametern abhängig:

- Anzahl der Unterbrechungen:
Mit zunehmender Unterbrechungszahl steigt der Verbesserungsfaktor, die relative Verbesserungszunahme nimmt ab.
- Aufteilung der Gesamtspannung auf die einzelnen Teilstrecken:
Durch ungleiche Spannungsverteilungen wird der Verbesserungsfaktor reduziert. Die Wirkung ist von der relativen Abweichung des höchsten Teilpotentials abhängig.
- Schlagweite in den einzelnen Teilstrecken:
Bei einer linearen Kennlinie der Einfachunterbrechung bis zu einer Schlagweite von s_{lin} wird der maximale Verbesserungsfaktor einer n -fach-Unterbrechung erst bei der Gesamtschlagweite von $n * s_{lin}$ erreicht.
- Exponent a der entsprechenden Einfachunterbrechung

Unter Berücksichtigung der theoretischen Randbedingungen werden Verbesserungsfaktoren der Zweifachunterbrechung im Bereich von 1,23...1,41 erwartet. Entsprechende Verbesserungen für Drei- bis Sechsfach-Unterbrechungen liegen bei ca. 1,5 bis 2. Zusätzliche Verbesserungen der Spannungsfestigkeit gegenüber derzeit existierenden Anordnungen sind z. B. durch Feldoptimierungen möglich.

Für die Durchschlagsversuche wurden Elektroden aus Edelstahl mit Durchmessern von 60 mm...100 mm verwendet. Vor den eigentlichen Messungen mit sukzessiver Steigerung einer 1,2/50- μ s-Blitzstoßspannung wurden die Elektroden mechanisch und elektrochemisch geglättet und mit einer stromgesteuerten 50-Hz-Wechselspannung konditioniert.

Durch ein einfaches Radiusprofil der Elektroden konnten deutliche Verbesserungen in der elektrischen Festigkeit von Ein- und Zweifachunterbrechungen erreicht werden. Besonders im Vergleich zu Axialmagnetfeld-Kontakten mit geschlitzten Oberflächen wurden Spannungssteigerungen bis zu 20 % realisiert.

Die Bestimmung des freien Potentials von Zweifachunterbrechungen erfolgte durch Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode und Messungen mit Hilfe eines kapazitiven Sensors. Zusätzlich wurden die Eigenkapazitäten in den Teilstrecken simuliert und mit Hilfe einer RCL-Meßbrücke ermittelt.

Messungen an zwei in Reihe geschalteten 36-kV-Schaltröhren bestätigten zunächst den prognostizierten Effekt der Spannungssteigerung durch zwei Einzelunterbrechungen. Im Gegensatz zur allgemein angenommenen Theorie war die Kennlinie der einzelnen Schaltröhre allerdings bis zu einer Schlagweite von 8 mm linear. Entsprechend konnte der maximale Verbesserungsfaktor der Reihenschaltung von $V_2 \sim 1,25$ erst bei Schlagweiten oberhalb von 16 mm erreicht werden.

Zur Überprüfung der theoretischen Ansätze wurden zunächst Versuche an Zweifachunterbrechungen durchgeführt. Da ungesteuerte Ausführungen durch kapazitive Kopplungen ein Mittelelektrodenpotential von nur ca. 40 % erreichten, war die aktive Beeinflussung der Potentialverteilung zwingend erforderlich. Durch den Einsatz einer konzentrischen Steuerelektrode konnte bei einer ungeschirmten Anordnung diese Vorgabe präzise erreicht

werden. Eine gegenüber der Einfachunterbrechung um ca. 30 % erhöhte Durchschlagspannung von 590 kV bei einer Schlagweite von 2*15 mm bestätigte die Theorie.

Bild 1 zeigt die Feldberechnung dieser Anordnung. Die maximale Feldüberhöhung (1,5faches der Homogenfeldstärke) ist hier am Rand der Steuerelektrode. Um geschirmte Elektrodenanordnungen über Steuerelektroden zu beeinflussen, mußte eine komplexere Steuer-elektrodengeometrie entwickelt werden. Mit einem zylindrischen, koaxialen Steuerschirm wurde ein statisches Mittelelektrodenpotential von 50 % erreicht. Durchschlagspannungen von ca. 600 kV bei Schlagweiten von 2*19 mm und Verbesserungs-faktoren von ca. 1,35 zeigten die Leistungs-fähigkeit von geschirmten Zweifachunterbrechungen.

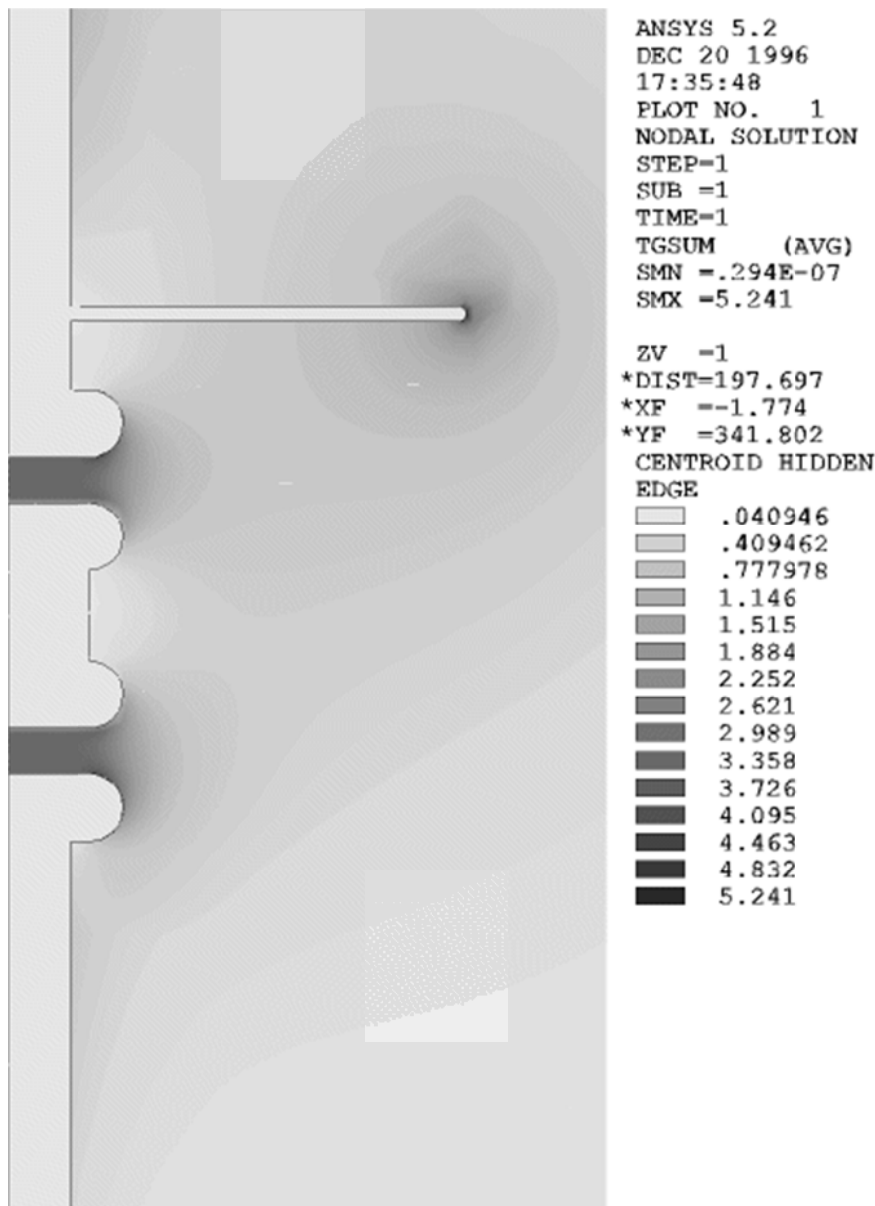


Bild 1: Feldberechnung einer Zweifachunterbrechung mit Steuerelektrode

Zur Überprüfung des Zweifachunterbrechungseffektes bei Anordnungen mit kleinen Dampfschirmdurchmessern (90 mm) wurde eine Geometrie mit minimalen

Feldüberhöhungen (<18 % über der Homogenfeldstärke) durch eingezogene Schirmenden und einen gewölbten Steuerschirm entwickelt. Aufgrund der kleineren Dimensionen war die Maximalschlagweite auf ca. 20 mm begrenzt. Verbesserungen der Durchschlagspannungen von 20 % zeigten auch hier den Erfolg der Zweifachunterbrechung.

Neben Potentialsteuerungen durch feldoptimierte Geometrien kann die Einstellung der freien Potentiale auch durch konzentrierte Kapazitäten innerhalb oder außerhalb des Vakuums erfolgen. Dabei ist die Größe der Kapazität auf ein Minimum zu reduzieren. Optimale Ergebnisse wurden auch mit nur einer Kompensationskapazität erzielt, die parallel zu der Schaltstrecke mit der kleineren Eigenkapazität geschaltet wurde.

Transiente Vorentladungen mit Impulsströmen bis zu einigen Ampere sind vakuumspezifische Phänomene. Obwohl die freien Potentiale von Mehrfachunterbrechungen hierdurch massiv beeinflusst werden können, haben sie sich nicht als primäre Durchschlagursache herausgestellt.

Bei einer ungeschirmten und feldgesteuerten Vierfachunterbrechung mit einer Schlagweite von 4*5 mm konnten Durchschlagspannungen von ca. 600 kV erreicht werden. Dieses entspricht einer Verbesserung von über 50 % gegenüber der Einfachunterbrechung. Höhere Durchschlagspannungen konnten durch die limitierte Spannungsfestigkeit des verwendeten Versuchsgefäßes nicht ermittelt werden. Bild 2 zeigt ein Ergebnis der Festigkeitsuntersuchungen.

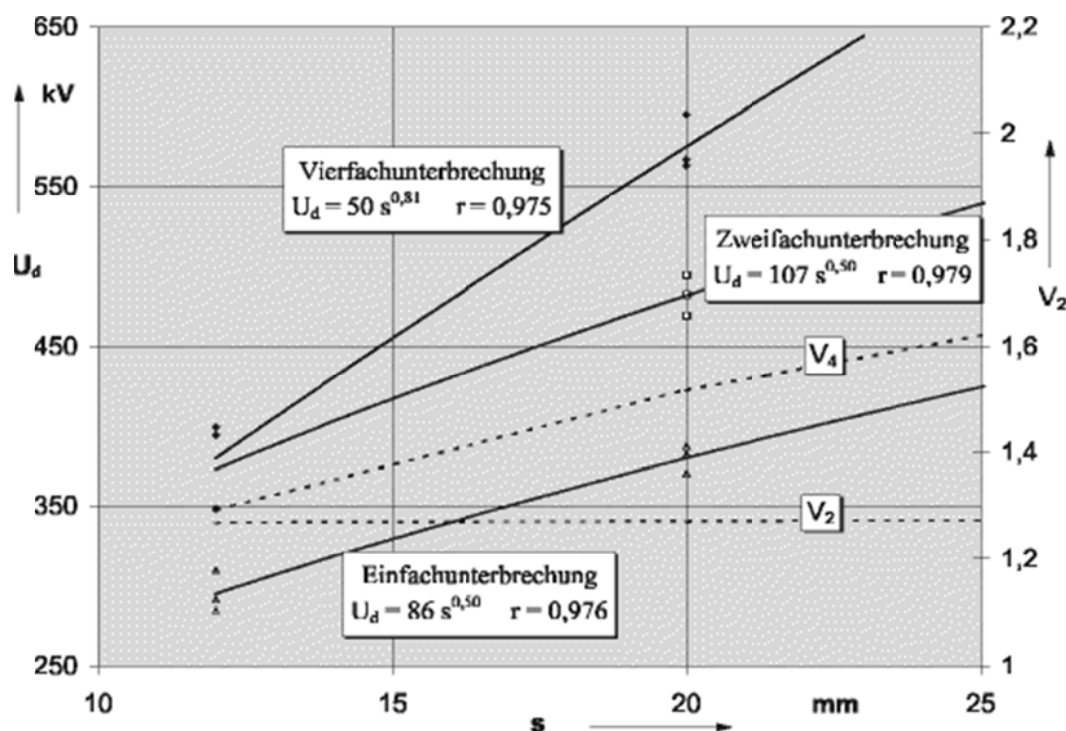


Bild 2: Durchschlagskennlinien von ungeschirmten Vier-, Zwei- und Einfachunterbrechungen mit Steuerelektrode

Die Ergebnisse der Versuche führen zu dem Modell einer zweifachunterbrechenden Vakuum-Schaltröhre, mit der eine Nennspannung von 72,5 kV erreicht werden soll. Mit geringen Maßnahmen zur Feldpflege erscheint damit auch eine Schaltröhre für 100 kV

möglich zu sein. Berücksichtigt wurde dabei ein Sicherheitsfaktor von 0,6. Zwei seriell geschaltete Röhren könnten hierdurch den gesamten Spannungsbereich bis 180 kV abdecken. Die dazu erforderliche Technologie greift im wesentlichen auf vorhandenes Know-how zurück.

Weiterführende Modelle mit bis zu sechs Unterbrechungen in einer Schaltröhre versprechen höhere Spannungsfestigkeiten. Zur Realisierung sind jedoch mehrere technologische Schritte erforderlich.

In Anbetracht der zu erwartenden Entwicklungs- und Produktionskosten sowie technisch bedingter Stückzahlen erscheint das Modell der zweifachunterbrechenden Schaltröhre als eine erfolgsversprechende Möglichkeit für den Einzug der Vakuumtechnologie in den Hochspannungsbereich.