

Einleitung

Die moderne Hochspannungs-Schaltgerätetechnik wird heute von Schwefelhexafluorid (SF_6)-Anwendungen beherrscht. Das Isoliergas SF_6 erfüllt in idealer Weise alle Anforderungen, die zum Schalten hoher Ströme in Hochspannungsnetzen notwendig sind. Das Löschgas zeichnet sich durch seine hohe elektrische Festigkeit, seine hervorragenden Eigenschaften bei der Kühlung des Schaltlichtbogens, seinen relativ geringen Preis und seine Intoxizität aus. Dennoch ist der Einsatz von SF_6 in den letzten Jahren umstritten. SF_6 trägt, wenn auch in einem sehr geringen Maße, zum globalen Treibhauseffekt bei. Seit der Umweltkonferenz von Kyoto (1997) ist den Industrienationen die Reduzierung des SF_6 -Ausstoßes vorgeschrieben. Da zukünftig weitere Reglementierungen im Zusammenhang mit der Verwendung von SF_6 nicht ausgeschlossen werden können, stellt sich für den Bereich der Hochspannungsschaltgeräte die Frage nach einer möglichen Alternative zu diesem Schaltprinzip. Der Vakuumtechnik könnte hier, gerade in den unteren Hochspannungsebenen, eine wichtige Bedeutung zukommen. In den Nieder- und Mittelspannungsnetzen hat sich der Vakuumschalter deutlich gegen andere Schalt-Prinzipien durchgesetzt. Bisher ist die Ausweitung des Vakuumschaltprinzips in die Hochspannungstechnik überwiegend nicht vollzogen worden, da keine ökonomische und ökologische Notwendigkeit bestand.

Lediglich in Japan hat eine konsequente Weiterentwicklung der Vakuumschalter-Technologie aus den Mittelspannungs-Netzen heraus in die Hochspannungs-Netze stattgefunden. Die Untersuchungen von Yanabu und anderen haben gezeigt, dass keine physikalische Grenze die Ausdehnung in den Bereich der Hochspannungs-Netze verhindert [Toshiba-96], [Yanabu-98], [Som-97], [Okawa-88], [Homma-98].

Viele Veröffentlichungen im Bereich der Vakuumschalttechnik bearbeiten entweder allein die elektrischen Voraussetzungen für den Hochspannungseinsatz oder die Optimierung der Mittelspannungsanwendungen (z.B. Erhöhung der Schaltfähigkeit, Baugrößenreduzierung).

In der hier vorliegenden Arbeit wird an realen Hochspannungs-Demonstratoren gezeigt, dass mit der Vakuumschalttechnik auch in untere Hochspannungsbereiche vorgedrungen werden kann, ohne Einbußen im Leistungsspektrum im Vergleich zu den bisherigen Schaltgeräten hinnehmen zu müssen (z.B. Kurzschlussströme bis 40 kA). Im Gegenteil, es ist sogar damit zu rechnen, dass hierdurch eine Erhöhung der Zu-

verlässigkeit und eine Reduzierung des Wartungsaufwandes solcher Schaltgeräte im Vergleich zu SF₆-Schaltern erzielt werden kann. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass eine wesentlich größere Anzahl an Nenn- und Kurzschlussstromabschaltungen mit dem Vakuumschalter beherrscht wird.

Über die letzten Jahrzehnte hinweg hat die Vakuumtechnik und besonders die Hochspannungs-Festigkeit von Elektrodenanordnungen im Vakuum einen Schwerpunkt der Institutsarbeit gebildet. Hierbei wurde in erster Linie die Hochspannungs-Festigkeit verschiedener Elektrodenanordnungen im Vakuum betrachtet.

Die Untersuchungen zur Spannungsfestigkeit von großen Schlagweiten (im Bereich von einigen cm), wie sie von Bender [Bender-87] durchgeführt wurden, haben gezeigt, welche Mechanismen unter Blitzstoßspannungs-Beanspruchung die Hochspannungs-Festigkeit bestimmen.

Die Arbeit Kahl [Kahl-93] betrachtet neben der Hochspannungs-Festigkeit verschiedener Schaltelektrodenformen auch den Einfluss des metallischen Dampfschirms (3 Elektrodenanordnung) auf die Gesamtfestigkeit. Seine Arbeit hat die Erreichbarkeit der Blitzstoßspannungs-Anforderungen für die 72,5- und 123-kV-Ebene gezeigt.

Der degressive Durchschlag-Kennlinienverlauf von metallischen Elektrodenanordnungen im Vakuum ist Grundlage für die Untersuchungen an Mehrfachunterbrechungen, die Sentker [Sent-98] durchgeführt hat. Mit dieser Technik der Reihenschaltung von Vakuumstrecken kleineren Abstandes lässt sich eine deutliche Festigkeitsverbesserung erzielen. Seine Ergebnisse sind fundamentale Grundlagen der hier vorliegenden Arbeit, sie wurden jedoch in erster Linie an Laboraufbauten mit Edeltahlelektroden durchgeführt.

Nach diesen Vorarbeiten stellt sich nun die Frage nach der Übertragbarkeit auf industriell gefertigte Vakuumschaltröhren. Können die Erkenntnisse, die an Modellanordnungen in zahlreichen Arbeiten gewonnen wurden, auf so genannte „Demonstratoren“ übertragen werden? Hierzu sollen zwei verschiedene Schaltertypen gefertigt werden. Diese beiden Typen unterscheiden sich durch die Anzahl der Unterbrechereinheiten innerhalb des Aluminiumoxid(Al₂O₃)-Vakuumgefäßes. Hierbei wird eine Variante mit einer Unterbrechereinheit und eine zweite mit zwei Unterbrechereinheiten ausgerüstet.

Eine weitere wichtige Frage, die sich in diesem Zusammenhang stellt, ist der Einfluss der Triple-Punkt-Bereiche. Gemeint sind hiermit die Zonen, in denen Al₂O₃-Keramik, metallischer Steuer-/Dampfschirm und Vakuum aufeinander treffen. Neben diesem Mechanismus soll auch der Einfluss des Flächeneffektes (*area-effect*) auf die Hochspannungs-Festigkeit der Vakuumröhren eingeordnet werden [Okawa-88].

Da die Hochspannungsfestigkeit nur ein Kriterium für die Eignung des Vakuumschaltpinzips für den Einsatz in Hochspannungsnetzen ist, werden in dieser Arbeit die beiden Röhrentypen auch mit zahlreichen Schaltleistungsversuchen getestet.

Die Demonstratoren sollen hierbei ihre Eignung zur Abschaltung sowohl von Kurzschlussströmen als auch von kapazitiven und induktiven Strömen zeigen. Während bisher nur Hochspannungs-Anwendungen mit einem Nenn-Kurzschlussausschaltstrom von 31,5 kA vorgestellt wurden, soll diese Arbeit die Abschaltfähigkeit für 40 kA un-

tersuchen. Hierbei wird sicher auch der Kontaktabstand der Schaltelektroden, während und direkt nach der Stromunterbrechung, eine wichtige Rolle spielen.

Das Entstehen von Röntgenstrahlung wird häufig als Argument genannt, dass eine Ausweitung des Vakuumschaltprinzips in die Hochspannung nicht möglich sei. Die Untersuchung von Dohnal [Dohnal-80] hat hier den Einfluss verschiedener Parameter auf das Strahlungsverhalten aufgezeigt. Die deutlichsten Effekte werden durch die Elektrodenoberflächen hervorgerufen.

In der vorliegenden Arbeit wird die Emission von Röntgenstrahlung bei betriebsfrequenter Wechselspannung an den beiden Demonstratortypen verglichen.

Unter Einbeziehung aller Erfahrungen, die in der Nutzung des Schaltprinzips unter Vakuum gesammelt werden konnten, werden letztendlich Konzepte vorgestellt, die den Einsatz von Vakuumschaltkammern in den unteren Bereichen der Hochspannungstechnik vielversprechend erscheinen lassen.

Die in dieser Arbeit zu behandelnde Problematik stellt somit einerseits eine konsequente Fortsetzung der bisher am Institut durchgeführten Arbeiten dar und ist andererseits darüber hinausgehend eine weiterführende Betrachtung der noch offenen Punkte bei der Dimensionierung einer Hochspannungs-Vakuumschaltröhre unter Einbeziehung der Probleme, die sich ergeben, sobald Laboraufbauten verlassen werden und praxisnahe Muster realer Schaltgeräte getestet werden.

Grundsätzliche Überlegungen zur Motivation der Arbeit

In der Hochspannungs-Schaltgerätetechnik werden heute überwiegend Komponenten mit Schwefelhexafluorid (SF_6)-Isolierung betrieben. Während im Bereich der reinen elektrischen Isolation noch einige wenige andere Prinzipien existieren (z. B. Öl-Papier in Wandlern), wird zur Unterbrechung von Kurzschlussströmen in Leistungsschaltern auf die hervorragenden Eigenschaften von SF_6 zurückgegriffen.

Das elektronegative, inerte und nicht toxische Gas weist für die energietechnischen Anwendungen sowohl im Hinblick auf die elektrische Festigkeit wie auch durch sein thermisches Verhalten deutliche Vorteile gegenüber den anderen Prinzipien auf [Solvay]. Die Durchschlagkennlinie ist linear vom Druck abhängig (zumindest im Bereich bis 1 MPa Überdruck und einigen hundert mm Kontaktabstand). Das thermische Verhalten bei der Bestromung des Lichtbogens erlaubt eine schnelle Wiederverfestigung der Schaltstrecke nach Stromnull. Aus technischer Sicht besteht also kaum Notwendigkeit, solche Anwendungen zu ersetzen.

Mit Hilfe des SF_6 in gekapselten Hochspannungs-Anlagen (GIS) ist es heute möglich, Energie auf engstem Raum zu verteilen und damit den Grundflächenbedarf einer GIS-Anlage gegenüber herkömmlichen Hochspannungs-Schaltfeldern auf 1/30 zu reduzieren [Knob-96].

SF_6 ist ein Gas mit hohem Treibhauspotenzial (das GWP¹ von SF_6 ist 23900 mal größer als das von CO_2 [Bartell-97]). Die Umweltkonferenz von Kyoto [Kyoto-97], 1997, hat in ihrem Abschlussprotokoll den Industrienationen vorgeschrieben, dass bis 2008/2012 (abhängig vom Gas und bezogen auf die Ausgangswerte von 1990/1995) der Ausstoß von sechs klimatisch relevanten Gasen im Durchschnitt um 5,2% zu reduzieren ist. Für Europa bedeutet dies eine Verminderung um 8% und für Deutschland um 21%. Neben dem Hauptanteil, den das CO_2 ausmacht, gehört zu diesen Gasen auch das SF_6 .

Die derzeitige SF_6 -Produktion in der Größenordnung von weltweit 8500 t (Stand: 1995) wird zu 33% von energietechnischen Geräten verbraucht [Bartell-97], wobei der Rest für Anwendungen wie Aluminiumindustrie, Isoliergas für Fensterscheiben, Halbleiterindustrie und Reifenfüllgas eingesetzt wird.

¹Global warming potential (GWP) für einen Zeithorizont von 100 Jahren.

Zur Reduzierung der Umweltbelastungen durch die Freisetzung von SF₆ haben die Hersteller von Hochspannungs-Geräten eine Reihe von Maßnahmen ergriffen. In erster Linie ist hier die Minimierung der Leckraten solcher Systeme zu sehen. Innerhalb der letzten Jahrzehnte ist die Leckrate deutlich gesenkt worden. Während anfangs 3 % pro Jahr erlaubt waren, wird in der aktuellen Norm nur noch ein Wert von maximal 1 % pro Jahr zugelassen [IEC 62271]. Weiterhin wird das SF₆ bei der Demontage von Altgeräten abgesaugt und dem Gashersteller zur Wiederaufbereitung zugeführt. Hierzu wird von den Herstellerfirmen ein Kreislaufsystem angeboten, z. B. von *Solvay*, bei dem das „verbrauchte“ Gas wiederaufbereitet wird und anschließend wieder zur Verfügung steht [Solvay-97]. Die energietechnischen Applikationen im Bereich der Hochspannungstechnik haben im Gegensatz zu vielen anderen Anwendungsgebieten den Vorteil, dass die SF₆-Mengen rückholbar (und wiederaufbereitbar) „lagern“. Lediglich die systembedingte Leckrate von $\leq 1\%$ der Gasmenge pro Jahr entweicht und gelangt somit in die Atmosphäre.

Mit der Diskussion über das Ausmaß der Klimabeeinträchtigung durch SF₆ ist die Frage nach möglichen Alternativen für die Schaltgerätetechnik neu entfacht worden. In früherer Zeit waren die Bemühungen in erster Linie darauf gerichtet, Gase mit noch besseren Eigenschaften zu finden. Die bisher untersuchten Alternativen, soweit sie schaltleistungstechnisch mit dem SF₆ vergleichbar sind, bergen aus Umweltsichtspunkten mindestens die gleichen Risiken wie das SF₆ selbst [Gänger-82].

In den letzten Jahren gingen die Untersuchungen in Richtung der Verwendung von Mischgasen (z. B. SF₆/N₂ und SF₆/O₂) nachdem alternative Gase, mit vergleichbar guten Eigenschaften in Bezug auf Dielektrik und Schaltleistung, nicht gefunden werden konnten [Niem-98]. Hierbei hat sich eine Trennung der Forderungen nach Isolierfähigkeit und Lichtbogenlöschfähigkeit herauskristallisiert. Die Ergebnisse zeigen, dass für die Löschung des Lichtbogens auf reines SF₆ derzeit nicht verzichtet werden kann, ohne erhebliche Einbußen in der Leistungsfähigkeit hinnehmen zu müssen. Die Schaltleistungsuntersuchungen mit Mischgasen liefern deutlich schlechtere Ergebnisse [Habe-01], [Knob-98], [Knob-01]. Für die reine dielektrische Festigkeit können Mischgase von SF₆ mit Stickstoff (N₂), Tetrafluormethan (CF₄) oder Kohlendioxid (CO₂) ähnlich gute Festigkeitswerte wie reines SF₆ liefern [Chalm-98], [Kuffel-98]. Vor dem Hintergrund dieser in Bezug auf die Schaltleistung eher enttäuschenden Ergebnisse könnte der Vakuumleistungsschalter zumindest partiell einige Bereiche übernehmen, die bisher durch klassische SF₆-Geräte abgedeckt werden. Hier kommen in erster Linie Anwendungen im Bereich der unteren Hochspannungs-Ebenen in Frage, da der degressive Kennlinienverlauf der Durchschlagspannung einem Einsatz in höheren Ebenen entgegensteht. Dieser nicht lineare Festigkeitsverlauf ist deutlich ausgeprägter als beim SF₆.

Das Ziel dieser Arbeit soll eine grundsätzliche Einschätzung der Verwendungsfähigkeit des Vakuumschaltprinzips in der Hochspannungs-Ebene 84 kV darstellen. Hierbei soll geklärt werden, ob hierfür bereits eine Reihenschaltung von zwei Unterbrechereinheiten notwendig ist oder ob ein Kontaktpaar ausreicht.

Die Tabelle 1 stellt nochmals die Hauptmerkmale der Schaltprinzipien Vakuum und

SF₆ gegenüber. Die starken Bemühungen, das Vakuumschaltprinzip in der Mittelspannung als Schaltmedium zu etablieren, fanden Ende der sechziger und Anfang der siebziger Jahre des 20. Jahrhunderts statt. Zu dieser Zeit sind eine Vielzahl von Entwicklungen forciert worden, die unbedingte Voraussetzung waren, um die physikalischen Prozesse zu beherrschen und einen kostengünstigen und sicheren Betrieb zu gewährleisten. Zu nennen sind hierbei vor allem die konstruktiven Maßnahmen zur Beherrschung der hohen Kurzschlussströme, wie Spiralkontakte, Topfkontakte und Axialmagnetfeld(AMF)-Kontakte.

Neben den unipolaren AMF-Kontakten (siehe Abbildung 1.7) wurden in den letzten Jahren auch wieder multipolare Kontaktsysteme untersucht und verwendet [Fink-00], [Fen-97]. Bei *Toshiba* wurde das unipolare Kontaktsystem weiter optimiert und seine Leistungsfähigkeit gesteigert, womit zumindest die Fläche der Kontaktscheibe reduziert werden konnte (SADE-Kontakt) [Homma-98].

Auch die Untersuchungen in Bezug auf geeignete Werkstoffe für die Kontaktscheiben waren notwendig, um große Kurzschlussströme zu beherrschen. Hier hat sich das Sintermaterial CuCr in verschiedenen Mischungsverhältnissen durchgesetzt. Das Material bietet einen Kompromiss zwischen guten Schaltleistungsergebnissen und akzeptablem Abreissstromverhalten [Rein-83].

Des Weiteren sind viele Bemühungen im Bereich der Fertigungsverfahren notwendig gewesen, um eine gleich bleibende Qualität der Vakuurröhren zu gewährleisten und den Vakuumschalter zu einem extrem zuverlässigen Schalterkonzept zu machen [Renz-91]. In diesem Zusammenhang müssen auch die Lötverfahren zur Massenfertigung gesehen werden. Die Umstellung vom „Pumpstängelverfahren“² auf das „Verschlusslötverfahren“³, die alle namhaften Hersteller vollzogen haben, hat sowohl die Produktivität als auch die Zuverlässigkeit verbessert.

Aufgrund des degressiven Verlaufes der Durchschlagspannungscharakteristik ist das Vakuumschaltprinzip für Leistungsschalter bisher auf die Mittelspannung beschränkt geblieben. Nur in Japan wurde konsequent an der Weiterentwicklung gearbeitet. Die Tendenzen, die es auch in den USA, z. B. bei der *General Electric Company*, gegeben hat, mit Hilfe der Reihenschaltung von 45-kV-Röhren in den Hochspannungsbereich vorzustoßen, sind durch den Erfolg des SF₆-Schalters schnell aufgegeben worden. Die damalige Planung sah eine Schalterreihe bis zu einer Spannungsebene von 800 kV vor. Hierzu hätte man 14 der 45-kV-Röhren in Reihe schalten müssen, wobei schon damals, im Jahre 1975, ein Kurzschlussstrom von 50 kA angestrebt wurde [Shores-75].

Im Gegensatz hierzu haben die japanischen Bemühungen zu einer Vielzahl von An-

²Bei dem Pumpstängelverfahren wird die komplette Vakuurröhre fertig gelötet. Erst dann wird diese Röhre über den Pumpstängel evakuiert. Eine Heizdecke ermöglicht das Absaugen der Restgase. Der Pumpstängel wird dann kaltverschweißend abgedrückt (ein vakuumdichter Verschluss).

³Beim Verschlusslötverfahren werden teilweise vorgelötete Komponenten fertig montiert. In einem Lötöfen werden die vormontierten Vakuurröhren-Komponenten dann durch ein gezieltes Temperaturprofil und Evakuierung des kompletten Ofens verlötet. Das Verfahren wird häufig auch als „one shot brazing in vacuum“ Verfahren bezeichnet.