

Ausführung, Einsatz und Betrieb von SF₆-isolierten, magnetischen Wandlern für GIS und AIS

C. Neumann, RWE Energie, Essen

1. Einleitung

Hochspannungswandler haben die Aufgabe, Strom- und Spannungssignale von Hochspannungspotential auf Erdpotential zu übertragen und gleichzeitig eine Signalanpassung an die angeschlossenen Sekundäreinrichtungen vorzunehmen. In gasisolierten, metallgekapselten Schaltanlagen werden hierzu seit mehr als zwei Jahrzehnten magnetische Strom- und Spannungswandler mit SF₆-Isolierung eingesetzt. Seit einigen Jahren kommt diese Technologie auch bei Freiluftwandlern als Alternative zur ölisolierten Technik zur Anwendung /1, 2/.

Im folgenden soll Aufbau, Einsatz und Betrieb solcher SF₆-isolierter Wandler behandelt werden.

2. Grundsätzlicher Aufbau

Die Hauptisolierung von SF₆-Wandlern wird mit dem Isoliergas SF₆ ausgeführt. Für die Lagenisolierung werden Kunststoff-Folien verwendet, die man mit SF₆-Gas imprägniert. Um eine möglichst weitgehende Vereinheitlichung zu erreichen, ist man bemüht, die wesentlichen Bauelemente sowohl für GIS-Wandler als auch für Freiluftwandler zu benutzen.

2.1 Wandler für GIS-Anlagen

2.1.1 Stromwandler

Stromwandler in einphasig gekapselten SF₆-Anlagen werden im Zuge des Rohrleiters eingebaut. Werden die Stromwandlerkerne außerhalb des Gasraumes angeordnet, so kann das Mantelrohr als Kernschale benutzt werden (Bild 2.1.1 a). Sollen die Kerne mit in den Gasraum einbezogen werden, so kommt ein Wandlergehäuse mit einem entsprechend größeren Außendurchmesser zum Einsatz. Die Kerne befinden sich dann auf einer innenliegenden Kernschale, die etwa den Durchmesser des Kapselungsrohres besitzt (Bild 2.1.1 b). In jedem Fall ist auf eine Unterbrechung der Kernschale bzw. des Mantelrohres zu achten, um eine Verfälschung des Meßstromes durch Kapselungsströme zu vermeiden. Die Isolierung der Unterbrechungsstelle ist so auszulegen, daß auch bei schnellen Ausgleichsvorgängen eine ausreichende Spannungsfestigkeit gewährleistet ist.

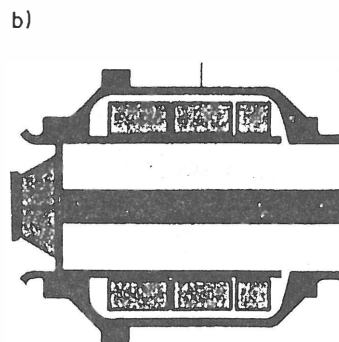
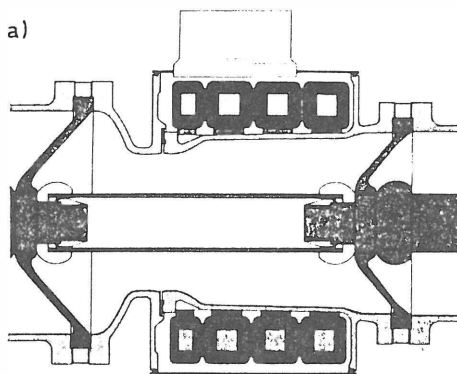


Bild 2.1.1
GIS-Stromwandler;
a) Wandlerkerne außerhalb
des Mantelrohres

b) Wandlerkerne innerhalb der
Kapselung

2.1.2 Spannungswandler

Das Aktivteil des Spannungswandlers ist in einem metallischen Kessel untergebracht, der an die Anlage angeflanscht wird (Bild 2.1.2). Der hochspannungsseitige Anschluß wird über eine Leiterverbindung an den Innenleiter der Anlage angeschlossen. Die SF₆-Gasdichte entspricht meist der Isoliergasdichte der Anlage. Zum Schutz vor unzulässiger Druckerhöhung im Falle eines inneren Lichtbogens wird das Gehäuse mit einer Bersteinrichtung ausgerüstet.

Das Aktivteil ist wie folgt aufgebaut. Auf den Kern, der an den Kesselwandungen befestigt ist, wird auf einem Trägerrohr die Niederspannungswicklung aufgebracht. Darüber folgt dann die Hochspannungswicklung. In den höheren Spannungsebenen wird diese Wicklung mit einer zusätzlichen kapazitiven Steuerung ausgeführt. Der dargestellte Wandler ist 3fach gestuft.

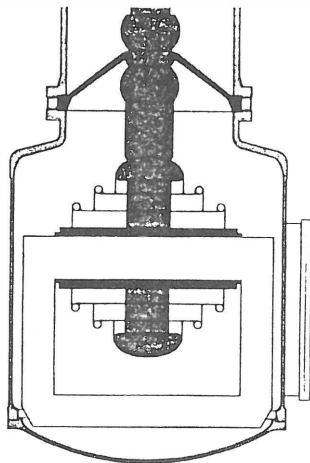


Bild 2.1.2
GIS-Spannungswandler

2.2 Kombiwandler für Freilufteinsatz

SF₆-isolierte Freiluftwandler sind seit einigen Jahren im Einsatz. Sie kommen insbesondere als Kombiwandler zur Anwendung. Der grundsätzliche Aufbau ist in Bild 2.2.1 dargestellt.

Strom- und Spannungswandlerteil befinden sich in einem gasdichten Metallgehäuse. Der Stromwandlerteil wird als Durchführungswandler ausgeführt. Die Kerne mit den Sekundärwicklungen sind in einem Kerngehäuse untergebracht. Es liegt auf Erdpotential und wird mit Stützisolatoren auf der hochspannungsseitigen Flanschplatte abgestützt.

Über dem Stromwandler ist der Spannungswandlerteil angeordnet. Auf den Kern, der sich auf Hochspannungspotential befindet, wird zunächst die Hochspannungsspule aufgebracht. Sie ist von innen nach außen gewickelt und mit Steuerelektroden zur Vergleichmäßigung der kapazitiven Spannungsaufteilung versehen. Über der Hochspannungswicklung befindet sich dann die Niederspannungswicklung.

Die Sekundärausleitungen werden über eine Durchführungsanordnung auf Erdpotential geführt. Bis 245 kV kann dieser Bereich als Gasdurchführung gestaltet werden. Darüber hinaus werden kapazitiv gesteuerte Durchführungsanordnungen verwendet. Meist werden folienisolierte Durchführungen mit einer vielstufigen kapazitiven Steuerung eingesetzt, es sind aber grobgestufte Ausführungen mit ein oder zwei Zwischenelektroden in reiner Gasisolierung denkbar.

Anstelle des Porzellanisolators werden SF₆-Wandler für Freilufteinsatz heute meist mit einem Verbundisolator, aus einem Kunststoffrohr aus Epoxidharz mit aufvulkanisierten Silikonschirmen bestehend, ausgerüstet. Derartige Isolatoren weisen unter Fremdschichteinfluß ein günstigeres Betriebsverhalten als Porzellanisolatoren auf. Aber auch im Störfall bei einem inneren Lichtbogen bieten sie deutliche Vorteile /3/.

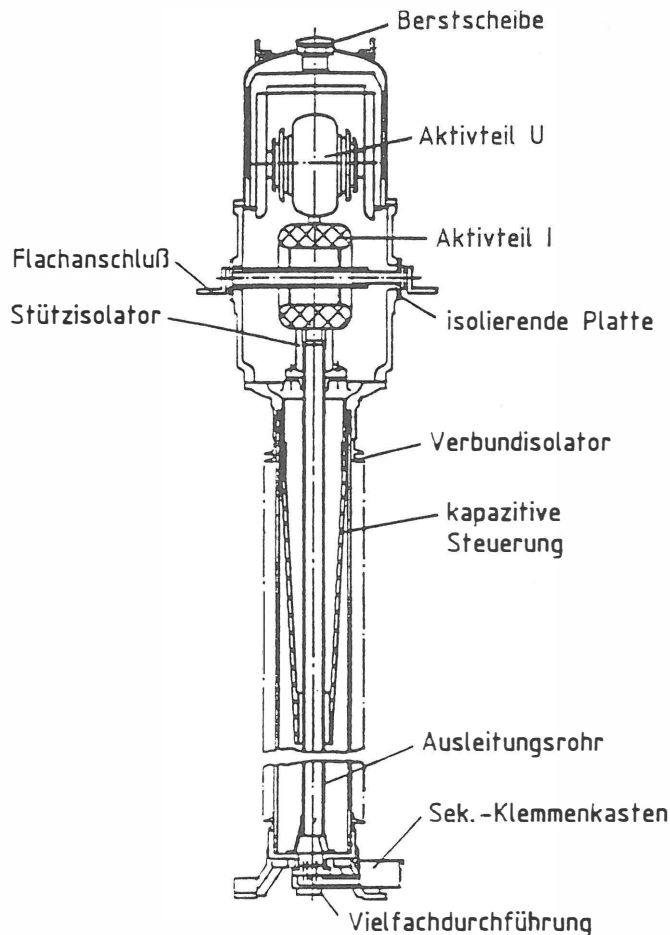


Bild 2.2.1
SF₆-isolierter Freiluft-
Kombiwandler

3. Einsatz von SF₆-isolierten Wandlern

Meßwandler erfahren wie andere Betriebsmittel der Energietechnik verschiedenste elektrische Beanspruchungen während des Betriebes, wie z. B. zeitweilige Spannungsüberhöhungen, Überspannungen mit langsamem und schnellem Anstieg sowie sehr schnelle transiente Überspannungen. Die meisten dieser Vorgänge sind in den einschlägigen Vorschriften berücksichtigt und werden durch entsprechende Prüfungen abgedeckt. Darüber hinaus gibt es einige weitere Beanspruchungen, die für ein zuverlässiges Betriebsverhalten von Bedeutung sind und die beim Einsatz von SF₆-Wandlern zu beachten sind.

3.1 Kippschwingungsgefährdung

Durch Schaltvorgänge können Wandler in bestimmten Anlagen- bzw. Netzkonfigurationen zu Kippschwingungen angeregt und damit thermisch überbeansprucht werden /4, 5/. Eine solche kritische, zu Kippschwingungen neigende Schaltungsanordnung ist in Bild 3.1.1 dargestellt.

Nach Ausschalten des Leistungsschalters entlädt sich die Wandlerkapazität über die veränderliche Induktivität des Spannungswandlers in Form eines Schwingungsvorganges. Abhängig vom Spannungsteiler C_1/C_2 und der Magnetisierungskennlinie des Spannungswandlers kann es zu einer abklingenden oder stehenden Kippschwingung kommen.

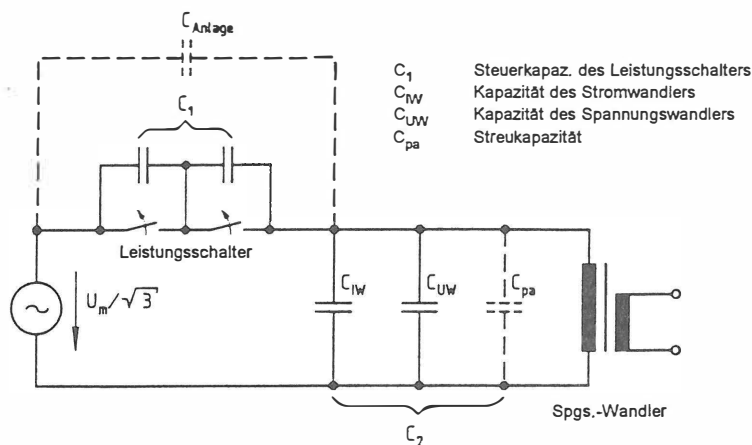


Bild 3.1.1
Zu Kippschwingungen
neigende Schaltungsanordnung

3.1.1 Freiluft-Spannungswandler mit verringerter Betriebsinduktion

Solche stehenden Kippschwingungen lassen sich durch eine entsprechende Dimensionierung des Wandlers und der Steuerkapazität des Leistungsschalters vermeiden. Anhand von Simulationsrechnungen und begleitenden Netzversuchen konnte eine Auslegung für ölisierte Wandler ermittelt werden, bei der ein Abklingen des Schwingungsvorganges gewährleistet ist (Bild 3.1.2 a).

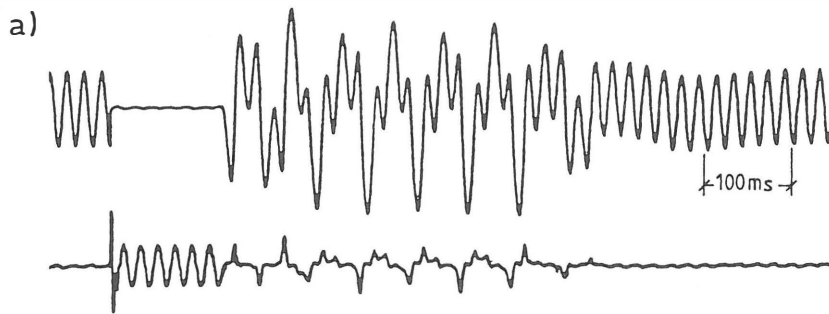
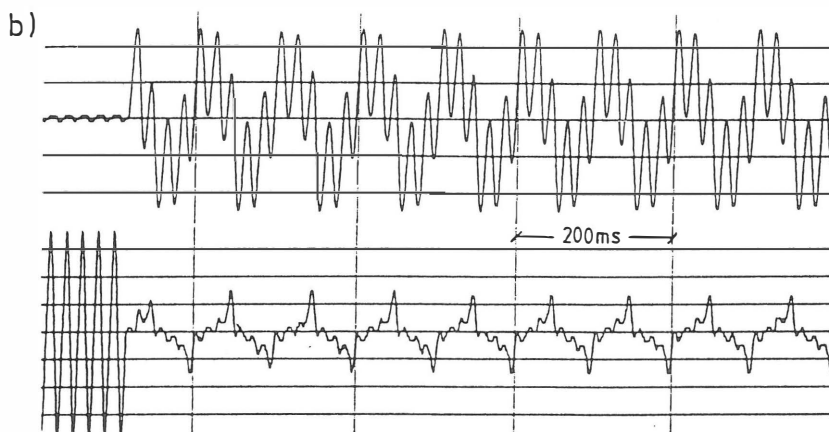


Bild 3.1.2
Kippschwingungen in
Anordnung nach Bild 3.1.1 1)

a) Abklingende
Kippschwingung mit
ölsolierten Kombiwandler

b) Stehende Kippschwingungen
mit SF₆-isoliertem
Kombiwandler



Dabei wurde für einen Freiluft-Leistungsschalter eine Steuerkapazität von insgesamt 250 pF, die zu einer Versteuerung der Schaltstrecken von 5 % führt, angenommen. Bei größeren Steuerkapazitäten von z. B. 350 pF traten stehende Kippschwingungen auf. Ein nach den gleichen Kriterien ausgelegter SF₆-isolierter Wandler konnte in dieser Anordnung jedoch nicht kippschwingungsfrei betrieben werden (Bild 3.1.2 b).

Ursache hierfür ist die wesentlich geringere Eigenkapazität des Wandlers und die somit über den Spannungsteiler C₁/C₂ eingekoppelte höhere Teilspannung am Wandler nach Ausschalten. Durch Verringerung der Betriebsinduktion konnte jedoch auch hier eine kippschwingungsfreie Ausführung des Wandlers erreicht werden.

1) Aus versuchstechnischen Gründen wurde der Schwingungsvorgang durch kurzzeitiges Kurz-schließen der Sekundärwicklung angeregt.

3.1.2 Spannungswandler in GIS-Anlagen mit Bedämpfungseinrichtung

In SF₆-isolierten, metallgekapselten Schaltanlagen ist das Teilverhältnis C_1/C_2 noch ungünstiger (Bild 3.1.3). Zum einen muß der Leistungsschalter wegen der metallischen Kapselfelung mit einer wesentlich größeren Steuerkapazität C_1 ausgerüstet werden und zum anderen beträgt die Kapazität C_2 nur wenige hundert pF, da neben der Eigenkapazität des Spannungswandlers nur die Kapazität des Rohrleiters zwischen Leistungsschalter und Abgangstrennschalter mit ca. 60 pF/m angesetzt werden kann. Eine geänderte Auslegung des Spannungswandlers ist in diesem Fall ohne Erfolg oder führt zu einer äußerst unwirtschaftlichen Lösung. Daher versucht man, durch zusätzliche Verluste die Kippschwingungen zu bedämpfen.

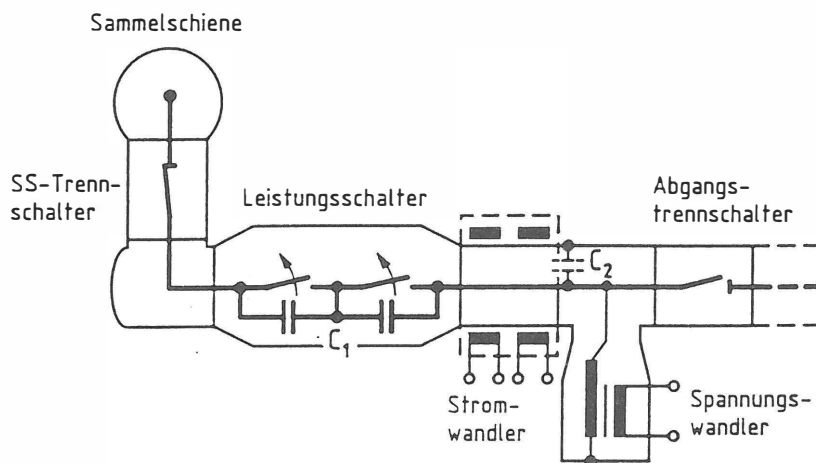


Bild 3.1.3
Zu Kippschwingungen
neigende Schaltungsanordnung
nach Bild 3.1.1 in GIS-Anlagen

Als Bedämpfungseinrichtung werden passive Bauelemente, z. B. Wirkleistungs-drosseln auf der Sekundärseite der Wandler, bevorzugt. Die Wirkleistungs-drosseln sind so auszulegen, daß im Normalbetrieb, bei zeitweiligen Überspannungen und bei Schalthandlungen die Meßgenauigkeit des Wandlers nicht unzulässig beeinflußt wird. Die Sättigungsinduktion der Wirkleistungs-drossel sollte daher bei $1,3 \dots 1,5 U_m$ liegen. Bild 3.1.4 zeigt das Ausschwingverhalten eines mit einer solchen Bedämpfungseinrichtung beschalteten Wandlers. Man sieht, daß die stehenden Kippschwingungen bereits im Ansatz gedämpft werden und sehr schnell abklingen.

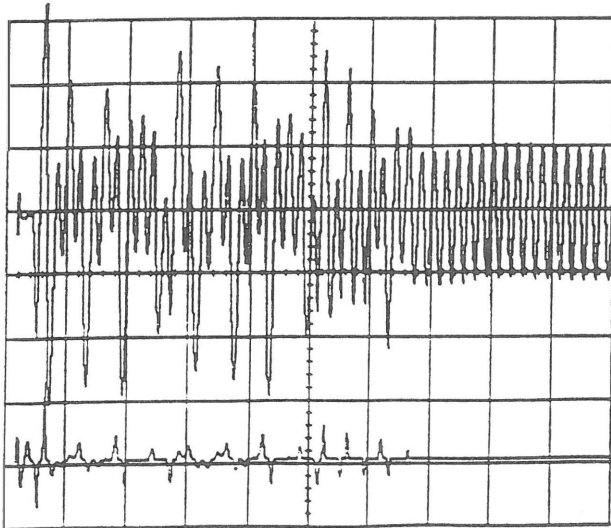


Bild 3.1.4
Abklingende
Kippschwingungen durch
Bedämpfungseinrichtung

3.2 Transiente Überspannungen

Transiente Überspannungsvorgänge auf der Hochspannungsseite werden von den Wandlern auch auf die Niederspannungsseite übertragen. Solche Vorgänge entstehen, insbesondere durch Spannungssprünge beim Schalten von Trennschaltern, aber auch beim Schalten von Leistungsschaltern oder im Zusammenhang mit nahen Kurzschlüssen. Die hierbei an den Sekundärklemmen auftretenden Überspannungen dürfen an den angeschlossenen Sekundäreinrichtungen keine Zerstörungen oder Fehlfunktionen hervorrufen.

3.2.1 Freiluftwandler

Freiluftwandler werden, insbesondere durch Vorgänge beim Schalten von Freiluft-Trennschaltern, angeregt. Die dabei auftretenden Überspannungen besitzen eine Anstiegszeit von 100 ... 200 ns und eine Frequenz von einigen 100 kHz bis zu wenigen MHz.

Die durch diese Anregung auf der Sekundärseite des Strom- und Spannungswandlers eines 245-kV-Kombiwandlers hervorgerufenen Überspannungen bei einem Spannungssprung von $\Delta U = 1$ pu sind in Bild 3.2.1 dargestellt.

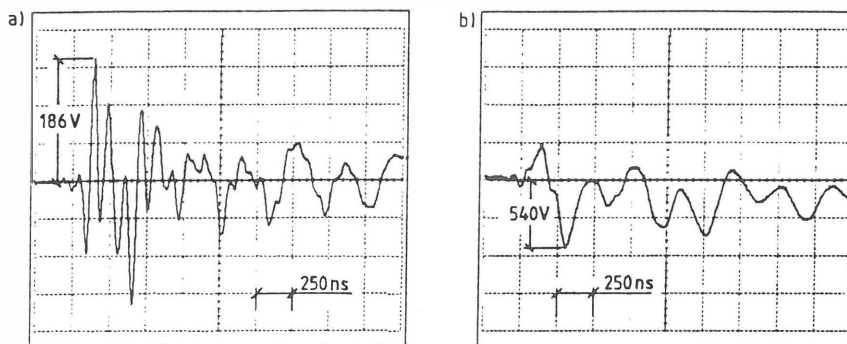


Bild 3.2.1
Transiente Überspannungen
auf der Sekundärseite eines
SF₆-isolierten 245-kV-
Freiluft-Kombiwandlers

a) an den Klemmen des
Stromwandlers

b) an den Klemmen des
Spannungswandlers

An den Sekundärklemmen des Stromwandlers ergibt sich ein Schwingungsvorgang mit 2,5 ... 3 MHz, dem zu Anfang ein höherfrequenter, rasch abklingender Anteil mit ca. 10 MHz überlagert ist. Die max. Amplitude beträgt etwa 200 V.

Der Vorgang auf der Sekundärseite des Spannungswandlers stellt sich als 3 MHz-Schwingung dar, die einer schwach ausgebildeten, niederfrequenten Schwingung überlagert ist. Die max. Überspannung liegt bei ca. 550 V.

3.2.2 Wandler in GIS-Anlagen

Wandler in SF₆-Anlagen werden durch wesentlich steilere und hochfrequentere Überspannungsvorgänge, welche beim Schalten von SF₆-Trennschaltern entstehen, angeregt. Diese Vorgänge weisen eine Anstiegszeit von 5 ... 10 ns und eine Frequenz von einigen MHz bis zu einigen 10 MHz auf.

An der Unterbrechungsstelle des Stromwandlergehäuses können diese hochfrequenten Vorgänge auf die Kapselung ausgekoppelt werden. Die hierdurch auf der Sekundärseite eines 420-kV-Stromwandlers hervorgerufenen Überspannungen sind aus Bild 3.2.2 zu entnehmen. Die Anregung erfolgt mit einem Spannungssprung von $\Delta U = 1$ pu beim Einschalten eines SF₆-Trennschalters.

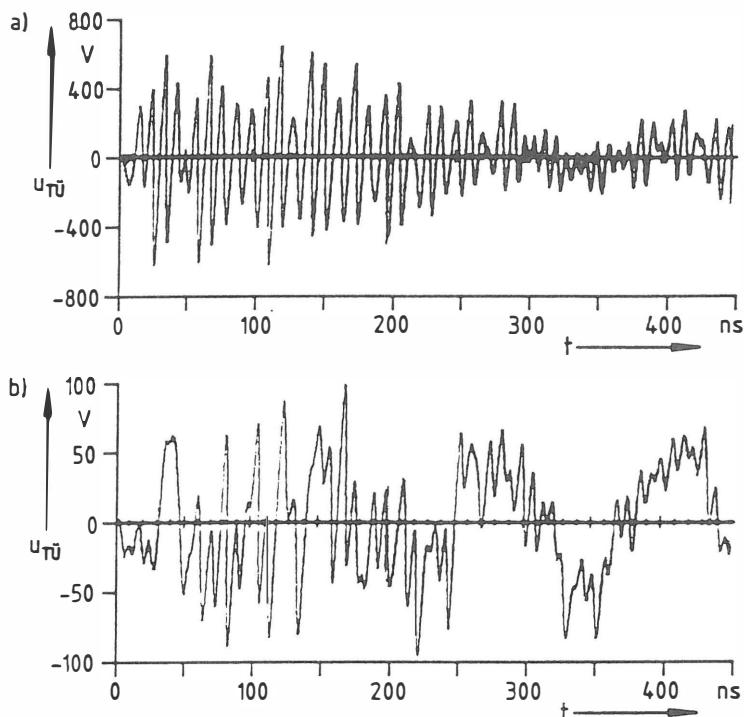


Bild 3.2.2
Transiente Überspannungen
auf der Sekundärseite eines
420-kV-GIS-Stromwandlers

a) an den Wandlerklemmen

b) an den Klemmen der
Sekundäreinrichtung am Ende
eines 10 m langen
Sekundärkabels

Die an den Sekundärklemmen gemessene Überspannung (Bild 3.2.2 a) zeigt zu Beginn eine ausgeprägte Schwingung von etwa 100 MHz. Nach deren Abklingen ist eine weitere Schwingung mit einer Frequenz von einigen MHz zu erkennen. Die max. Amplitude beträgt ca. 900 V. Am Ende eines etwa 10 m langen mit Nennbürde abgeschlossenen Sekundärkabels (Bild 3.2.2 b) mißt man eine max. Überspannung von 100 V. Die Dämpfung ist relativ ausgeprägt, da das Signal sehr hochfrequente Anteile enthält, die durch das Kabel besonders stark gedämpft werden. Im vorliegenden Fall bewirkt das Kabel eine Dämpfung um ca. 20 dB.

Auf der Sekundärseite von gasisolierten, metallgekapselten Spannungswandlern werden transiente Überspannungen, wie sie in Bild 3.2.3 dargestellt sind, gemessen. Im vorliegenden Fall handelt es sich um einen 420-kV-Spannungswandler, der ebenfalls durch das Schalten eines SF₆-Trennschalters mit einem Spannungssprung von $\Delta U = 1$ pu angeregt wurde. Im Überspannungsverlauf ist eine 1-MHz-Schwingung mit einem zu Anfang überlagerten Anteil im Bereich einiger 10 MHz zu erkennen. Durch das Sekundärkabel werden die hochfrequenten Anteile, wie Bild 3.2.3 b zeigt, stark gedämpft, wohingegen die 1-MHz-Schwingung nicht beeinflusst wird. Aus der gemessenen max. Überspannungsamplitude von ~ 500 V läßt sich ableiten, daß im Betrieb - unter der Voraussetzung eines max. möglichen Spannungssprunges von $\Delta U = 2$ pu - mit max. Überspannungen von ~ 1000 V zu rechnen ist.

Die zulässigen Überspannungen an den Klemmen der angeschlossenen Sekundäreinrichtungen sind auf die vorgenannten transienten Vorgänge hinsichtlich Amplitude und Frequenz abzustimmen. Dieses Vorgehen kann als Isolationskoordination in Bezug auf die elektromagnetische Verträglichkeit aufgefaßt werden.

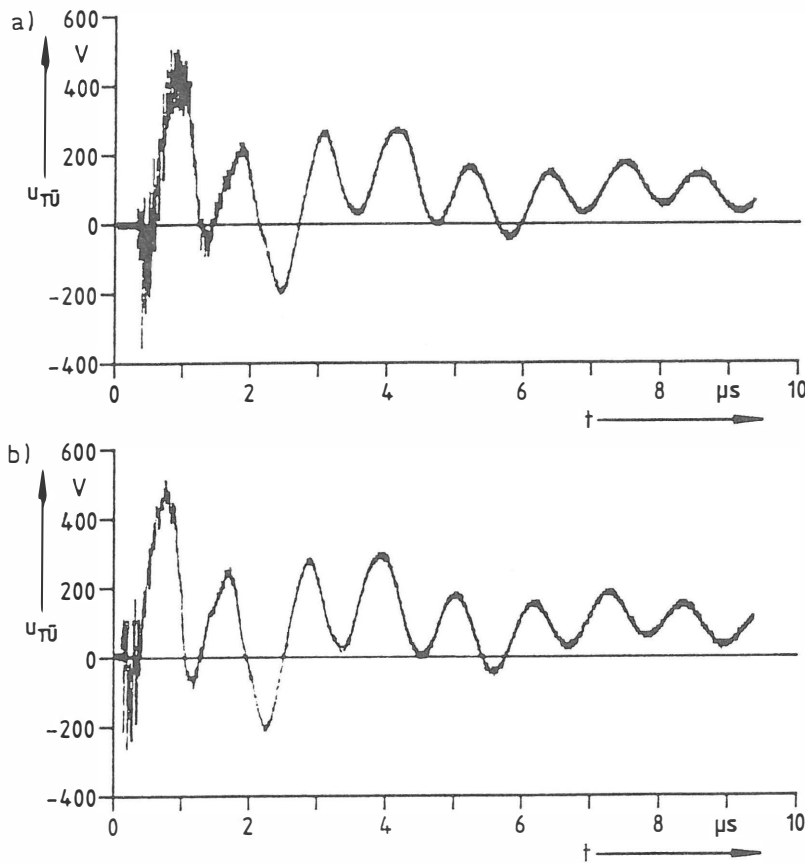


Bild 3.2.3
Transiente Überspannungen
auf der Sekundärseite eines
420-kV-GIS-Spannungs-
wandlers

a) an den Wandlerklemmen

b) an den Klemmen der
Sekundäreinrichtung am Ende
eines 10 m langen
Sekundärkabels

3.3 Auslegung von GIS-Spannungswandlern unter Berücksichtigung der Vorortprüfung

Gasisolierte, metallgekapselte Anlagen sollen nach Errichten vor Ort einer Hochspannungsprüfung unterzogen werden. Um die Anlage möglichst vollständig zu prüfen, ist man bemüht, die Spannungswandler mit in diese Prüfung einzubeziehen. Dies ist bei der Auslegung der Spannungswandler zu berücksichtigen.

Soll eine Prüfung mit 50-Hz-Wechselspannung durchgeführt werden, so muß die magnetische Induktion so gewählt werden, daß bei einer Prüfdauer von 1 min. mit Nenn-Stehwechselspannung keine Übererwärmung auftritt. Falls sich ein solcher Wandler in dem zur Verfügung stehenden Gehäuse nicht unterbringen läßt, kann die Prüfspannung bei der Vorortprüfung auf 80 % der Nenn-Stehwechselspannung und/oder die Nennleistung des Wandlers zurückgenommen werden.

Oftmals wird die Hochspannungsprüfung mit einer begleitenden TE-Messung kombiniert. Die Meßempfindlichkeit kann erheblich gesteigert werden, wenn die Prüfungen in der vollständig geschirmten Meßanordnung, bei der alle Elemente des Prüfkreises, auch der Prüfspannungserzeuger, mit in die Kapselung einbezogen werden [6/].

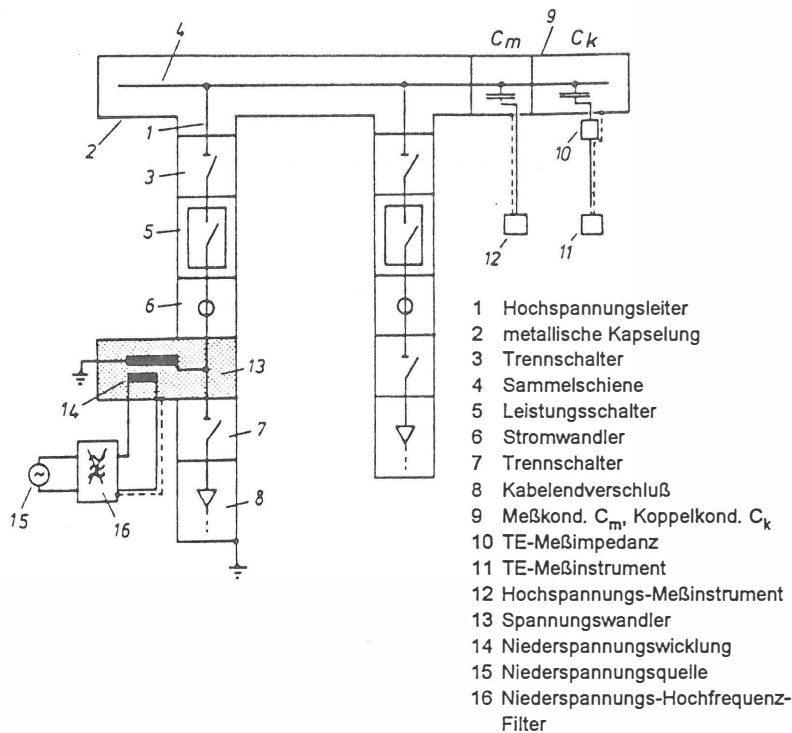


Bild 3.3.1
Vollständig geschirmte
Meßanordnung zur TE-
Messung von GIS-Anlagen mit
anlageneigenen
Spannungswandler zur
Prüfspannungserzeugung

Bild 3.3.1 zeigt eine solche vollständig geschirmte Meßanordnung. Insbesondere bei kleineren Anlagen läßt sich die Anordnung kostengünstig realisieren, wenn man die Prüfspannung durch sekundärseitige Erregung der anlageneigenen Spannungswandler erzeugt. In diesem Fall ist zusätzlich die Erwärmung der Wicklung durch die zu übertragende Leistung zu berücksichtigen. Ggf. kann die erforderliche Prüfleistung durch Parallelschaltung von mehreren Wandlern erreicht werden.

3.4 Beanspruchung von GIS-Wandlern durch schnelle Überspannungsvorgänge

Isoliersysteme von Spannungswandlern für gasisolierte, metallgekapselte Anlagen werden durch sehr schnelle Überspannungsvorgänge, die

- a) beim Schalten von Trennschaltern unter normalen Betriebsbedingungen
 - b) durch Überschläge bei der Vorortprüfung
- und
- c) durch Spannungszusammenbrüche im Fehlerfall entstehen können, beansprucht.

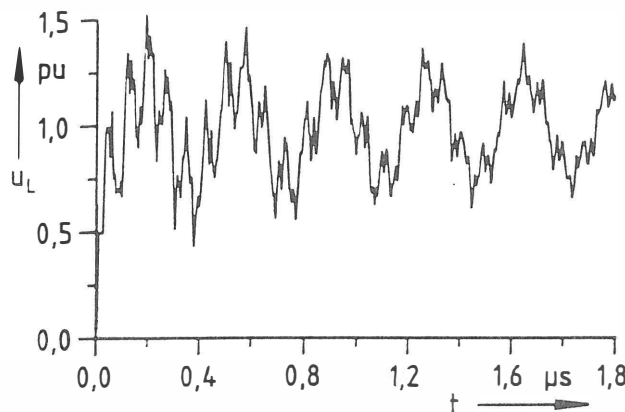


Bild 3.4.1
Beanspruchung von GIS-
Spannungswandlern durch
hochfrequente Vorgänge beim
Schalten von Trennschaltern

Beim Schalten von Trennschaltern unter normalen Betriebsbedingungen werden sehr schnelle Überspannungen von max. 2 pu erzeugt (Bild 3.4.1). Diese Vorgänge sind weniger wegen ihrer Amplitude, als vielmehr wegen ihrer Steilheit, ihrer Frequenz und ihrer Häufigkeit von Interesse. Da die Wicklung eines Spannungswandlers ein komplexes, schwingungsfähiges Gebilde darstellt, wird das Isoliersystem durch diese hochfrequenten Vorgänge in besonderer Weise beansprucht. Dabei muß vermieden werden, daß es zu einer lokalen Überbeanspruchung, verbunden mit Entladungen oder Teilentladungen und zu einer geringfügigen Anschädigung der Isolierung, kommt. In der Folge könnte dies aufgrund der Häufigkeit dieser Vorgänge - in der Praxis muß während der Lebensdauer eines solchen Gerätes mit mehreren 10.000 hochfrequenten Ausgleichsvorgängen beim Schalten von Trennschaltern gerechnet werden - zu einer schwerwiegenden Schädigung und zu einem Versagen der Isolierung führen.

Bei der Hochspannungsprüfung vor Ort sind Überschläge nicht zu vermeiden. In der Folge kommt es in der Anlage aufgrund des steilen Spannungszusammenbruches zu hochfrequenten Ausgleichsvorgängen. Durch Reflektions- und Brechungsvorgänge entstehen dabei sehr steile Überspannungen, die je nach Prüfspannungsform und -pegel die Nenn-Stehblitzstoßspannung überschreiten und zu Sekundärüberschlägen führen können.

Bei der Wechselspannungsprüfung sind aufgrund des Prüfspannungspegels Sekundärüberschläge in der Regel nicht zu erwarten, so daß bei dieser Spannungsform mit einer Überbeanspruchung der gesunden Isolierung nicht gerechnet werden muß. Einige für SF₆-Anlagen typischen Defekte lassen sich jedoch nur durch steile Impulsspannungen mit Anstiegszeiten bis zu 20 μs auffinden /7/. Daher wird insbesondere in höheren Spannungsebenen die Wechselspannungsprüfung durch eine Prüfung mit Blitzstoßspannung ergänzt. Hier ist zu prüfen, inwieweit die Wandlerisolierung einer Beanspruchung durch schnelle Überspannungen, hervorgerufen durch Überschläge bei der Blitzstoßspannungsprüfung, standhält. Ggf. muß der Prüfspannungspegel reduziert werden, z. B. auf 70 % der Nenn-Stehblitzstoßspannung /8/.

Überspannungsvorgänge, wie sie bei der Vorortprüfung in der Folge von Überschlägen auftreten können, sind auch während des Betriebes bei fehlerbedingten Spannungszusammenbrüchen nicht auszuschließen. Die Höhe der Überspannung hängt davon ab, ob sich der Spannungszusammenbruch aus der normalen Betriebsspannung oder aus einer

Überspannung entwickelt und mit welcher Steilheit sich der Spannungszusammenbruch vollzieht.

Inwieweit die bisher bekannten Modelle des Spannungszusammenbruchs, insbesondere die daraus abgeleiteten, großen Steilheiten, auch für die angeführten fehlerbedingten Spannungszusammenbrüche gültig sind, ist noch nicht eindeutig geklärt /9/. In jedem Fall sollten bei der grundsätzlichen dielektrischen Auslegung von Spannungswandlern derartige Überspannungsvorgänge bedacht werden. Denn es kann nicht zugelassen werden, daß ein Fehler in der Anlage einen Folgefehler in einer weiteren Anlagenkomponente oder in einem angeschlossenen Betriebsmittel verursacht.

4. Betrieb von SF₆-Wandlern

4.1 Überwachung und Diagnose

SF₆-isolierte Wandler gelten als nahezu wartungsfrei. Ihre Konstruktion ist so gewählt, daß unter normalen Bedingungen eine ausreichende Gasdichte gewährleistet ist, d. h. nur geringe SF₆-Gasleckagen auftreten und nur vernachlässigbare Mengen an Wasserdampf in den Gasraum hineindiffundieren.

Die dielektrische Auslegung wird so vorgenommen, daß Betriebsspannung, zeitweilige Spannungserhöhungen und Überspannungen keine Teilentladungen mit Zersetzung des SF₆-Gases hervorrufen.

Bei der thermischen Auslegung wird berücksichtigt, daß die eingesetzten Werkstoffe bei Erwärmung durch Betriebs- und Kurzschlußströme gegenüber SF₆-Gas beständig sein müssen, und es darüber hinaus zu keiner Zersetzung des SF₆-Gases durch katalytische Wirkung kommen darf.

Um die genannten Voraussetzungen für ein zuverlässiges Langzeitverhalten sicherzustellen, werden verschiedene Überwachungs- und Diagnosemaßnahmen an SF₆-Wandlern vorgenommen.

Zunächst ist darauf zu achten, daß die SF₆-Gasdichte den der Dimensionierung zugrundegelegten Mindestwert nicht unterschreitet. Hierzu wird der Wandler mit einer zweistufigen Überwachung ausgerüstet, welche in das Stör- und Warnmeldesystem des Schaltfeldes bzw. der Schaltanlage eingebunden wird. Meist kommen Dichtemesser in Form von temperaturkompensierten Manometern zum Einsatz. Die zweistufige Meldung erlaubt ein rechtzeitiges Eingreifen bei möglichen Gasverlusten. Bei Erreichen der ersten Warnstufe muß SF₆-Gas nachgefüllt werden, um die einwandfreie dielektrische Festigkeit des Isoliersystems zu gewährleisten. Die zweite Warnstufe zeigt an, daß die Nenn-Stehspannungswerte nicht mehr eingehalten werden. In diesem Fall muß der Wandler bzw. das betreffende Schaltfeld außer Betrieb genommen werden.

Wenn anzeigende Dichtemesser mit ausreichender Ablesegenauigkeit eingesetzt werden, lassen sich auch Änderungen der Gasdichte und damit unzulässige Leckagen frühzeitig erkennen. Hierzu wird die Gasdichte vom Betriebspersonal in vorgegebenen Intervallen registriert und in einem Diagramm ausgewertet. Bild 4.1.1 zeigt ein solches Diagramm für mehrere verschiedene Wandler.

Wandler 1 und 2 zeigen geringe Leckraten, die jedoch kleiner oder höchstens gleich der garantierten max. Leckrate von 1 %/a sind. Bei Wandler 3 wird eine Leckage mit einer gleichbleibenden Leckrate von 5 %/a festgestellt. Eine Grobortung ist zunächst ohne Erfolg, so daß nach 2 Jahren vor Erreichen der 1. Warnmeldung bei 3,5 bar SF₆-Gas nachgefüllt wird.

An Wandler 4 ist im Laufe der Betriebszeit eine Leckage mit zunehmender Leckrate zu erkennen. Nach einer Betriebszeit von 3 Jahren beschließt man eine genaue Lecksuche vor-

zunehmen. Da die Leckrate in etwa bekannt ist, kann der Zeitpunkt der Maßnahme längerfristig geplant und mit der Betriebsführung abgestimmt werden.

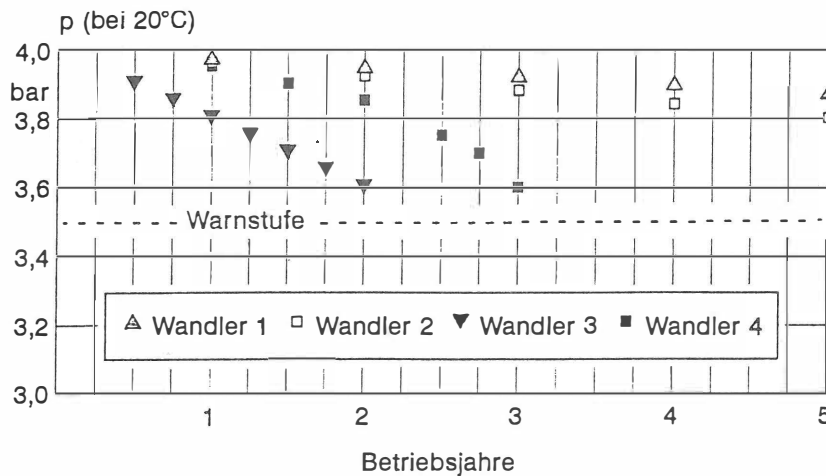


Bild 4.1.1
Leckraten von verschiedenen
SF₆-isolierten Freiluftwandlern

Neben der Gasdichte ist auch der Gaszustand zu überwachen. SF₆-Gas gilt zwar im allgemeinen als alterungsbeständig, jedoch können physikalische und chemische Prozesse auftreten, z. B. Eindringen von Feuchtigkeit oder Bildung von SF₆-Spaltprodukten durch TE oder katalytische Zersetzung, die den Gaszustand und damit die Isoliereigenschaften und die eingesetzten Werkstoffe negativ beeinflussen.

Durch Bestimmung der Isoliergasfeuchte und Messung von SF₆-Spaltprodukten läßt sich der Gaszustand überwachen, ohne daß man in die Gasräume eingreift [10]. Derartige Gasanalysen, z. B. im Rahmen von Instandhaltungsmaßnahmen oder Inspektionen, ermöglichen Hinweise auf Unregelmäßigkeiten im Inneren der gasisolierten Wandler.

Sie können Auskunft geben über

- die Qualität des Dichtungssystems
- elektrische Entladungen
- Korrosion an Metalloberflächen
- Veränderungen an Kunststoffen
- Wirksamkeit von Filtern.

4.2 Verhalten bei inneren Lichtbögen

SF₆-isolierte Wandler sind, wie die Betriebserfahrungen zeigen, zuverlässige Betriebsmittel. Darüber hinaus können Unregelmäßigkeiten im Isoliersystem durch diagnostische Methoden vielfach frühzeitig erkannt werden. Dennoch sind dielektrische Fehler und in der Folge innere Lichtbögen nicht vollständig auszuschließen. Um einen unzulässigen Druckanstieg und damit ein Bersten der Gehäuse oder Isolatoren zu vermeiden, werden diese mit Bersteinrichtungen ausgerüstet.

Gehäuse und Bersteinrichtungen für gasisolierte, metallgekapselte Wandler werden nach den für GIS-Anlagen bekannten Dimensionierungsgrundlagen ausgelegt. Danach muß die Kapselung dem Konstruktionsdruck genügen und darf im Falle eines inneren Lichtbogens bei Strömen bis 40 kA erst nach 200 ms und bei Strömen größer 40 kA erst nach 100 ms durchbrennen. Ein Bersten des Gehäuses ist erst nach 500 bzw. 300 ms zugelassen. Durch Ansprechen einer Bersteinrichtung kann eine Druckentlastung herbeigeführt werden. Der Ansprechwert der Bersteinrichtung sollte, sofern die Festigkeitswerte der Kapselung dies erlauben, so festgelegt werden, daß in der ersten Schutzstufe die Kapselung möglichst lange geschlossen bleibt, um so den Austritt von SF₆-Zersetzungsprodukten zu vermeiden.

Bei der Dimensionierung der Bersteinrichtung für gasisolierte Freiluftwandler ist sowohl die Festigkeit des metallischen Gehäuses als auch die des Isolators zu berücksichtigen. Die metallischen Gehäuse werden meist in Anlehnung an die für Kapselung von GIS-Anlagen für Berstdrücke von einigen 10 bar ausgelegt. Ähnlich hohe Berstfestigkeiten lassen sich auch mit Verbundisolatoren erreichen. Dabei sind die guten Festigkeitseigenschaften solcher Isolatoren bei dynamischen Beanspruchungen von Vorteil. Um einen ausreichenden Abstand zum höchsten auftretenden Betriebsdruck zu haben, wählt man für die Bersteinrichtungen meist einen Ansprechwert von ca. 10 bar.

5. Zusammenfassung

SF₆-isolierte Wandler kommen sowohl in GIS-Anlagen, meist als Strom- und Spannungswandler, als auch in Freiluftanlagen, meist als Kombiwandler, zum Einsatz. Die Hauptisolierung der Wandler erfolgt mit dem Isoliergas SF₆, für die Lagenisolierung werden SF₆-imprägnierte Kunststofffolien verwendet. Freiluftwandler werden anstelle von Porzellanisolatoren mit Verbundisolatoren ausgerüstet.

Beim Einsatz von SF₆-Wandlern sind einige Beanspruchungen besonders zu beachten. Um stehende Kippschwingungen zu vermeiden, ist die Betriebsinduktion der Spannungswandler zu verringern, wie dies bei Freiluftwandler geschieht, oder die Wandler sind mit Bedämpfungseinrichtungen auszurüsten, wie es bei GIS-Anlagen der Fall ist. In die Sekundärkreise übertragene transiente Überspannungen dürfen an den angeschlossenen Sekundäreinrichtungen keine Zerstörungen oder Fehlfunktionen hervorrufen. Zu besonders steilen und hochfrequenten Überspannungen kommt es auf der Sekundärseite von Wandlern in SF₆-Anlagen. Hier sind geeignete Abschirmmaßnahmen zu ergreifen, um die Überspannungen zu begrenzen. Sollen Spannungswandler in die Vorortprüfung von SF₆-Anlagen einbezogen werden, so muß dies bei der Auslegung berücksichtigt werden, ebenso wie eine mögliche Verwendung von anlageneigenen Spannungswandlern zur Prüfspannungserzeugung. GIS-Spannungswandler werden durch schnelle Überspannungsvorgänge beim Schalten von Trennschaltern, durch Überschläge bei der Vorortprüfung und durch Spannungszusammenbrüche im Fehlerfall beansprucht. Diese Vorgänge sollten bei der dielektrischen Auslegung bedacht werden.

SF₆-isolierte Wandler gelten als nahezu wartungsfrei. Durch verschiedene Überwachungs- und Diagnosemaßnahmen, Überwachung der Gasdichte, gasanalytische Untersuchungen des Gaszustandes, soll ein zuverlässiges Langzeitverhalten sichergestellt werden. Dennoch sind innere Lichtbögen infolge dielektrische Fehler nicht vollständig auszuschließen. Ein Bersten der Gehäuse oder Isolatoren kann in diesem Fall durch Ansprechen einer Bersteinrichtung vermieden werden.

6. Literatur

- /1/ M. Friedrich, F. Faltermeier. Autonome Wandler mit SF₆-Isolation. Bull. SEV/VSE 77 (1986) 5, S. 256 - 260.
- /2/ R. Heidingsfelder: Betriebserfahrungen mit SF₆-isolierten Meßwandlern in Freiluftausführung. Referat anlässlich des Seminars "Meßwandler für Mittel- und Hochspannungsnetze der Techn. Akademie Esslingen am 28. und 29. Nov. 1991.
- /3/ H. Büchner: Porzellan oder Verbundwerkstoffe als Gehäuse von Freiluftwandlern. Haefely-Symposium '93: "Betriebsmittel der Hochspannungsnetze" am 6. und 7. Okt. 1993 in Stuttgart.
- /4/ C.H. Petersen, A. Umlauf: Kippschwingungen in starr geerdeten Drehstromnetzen. Elektrizitätswirtschaft Jg. 79 (1980), S. 236 - 240.
- /5/ G. Balzer: Vermeidung von Ferroresonanzen in Drehstromnetzen. etz Archiv Bd. 4 (1982), S. 121 - 126.
- /6/ C. Neumann: Teilentladungs-Messungen an fabrikfertigen Schaltanlagen vor Ort. Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik, VDE-Verlag, Berlin, Offenbach; S. 249 - 272.
- /7/ X. Rong, K. Feser, W. Köhler: Influence of impulse voltages on the corona stabilizations in SF₆ under inhomogeneous field conditions. 8th Int. Sympos. on High Voltage Engineering, Yokohama, Japan, Aug. 1993.
- 8/ K. Feser, R. Sun, A. Eriksson, K. Fröhlich: On-site Dielectric Testing of GIS: Theoretical and Practical Considerations. IEEE PWD no. 2, vol. 6, Apr. 1991, S. 615 - 625.
- /9/ R. Weber: An arc-model for calculation of VFTO in case of breakdown in GIS. 8th Int. Sympos. on High Voltage engineering, Yokohama, Japan, Aug. 1993.
- /10/ C. Neumann, W. Heiß, R. Lekies: Diagnostische Methoden zur Überwachung des Gaszustandes von SF₆-Schaltgeräten und -Anlagen. ETG-Fachtagung "Isoliertesysteme der elektrischen Energietechnik - Lebensdauer, Diagnostik und Entwicklungstendenzen" am 26. und 27. Mai 1992 in Würzburg. Tagungsband S. 297 bis 307.