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: 72 (1981)

Heft: 1

Artikel: Betriebserfahrungen mit Messwandlern >100 kV und ihre Konsequenzen

Autor: Vorwerk, H.-J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905055

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: 11.07.2025

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

Betriebserfahrungen mit Messwandlern > 100 kV und ihre Konsequenzen

Von einer Arbeitsgruppe des FK 38 unter dem Vorsitz von H.-J. Vorwerk [1])

62–799;

Sich häufende Schäden an Messwandlern führten zu eingehenden Untersuchungen über die Ursachen. Diese lagen einerseits im ungenügenden Ölabschlußsystem und anderseits in Mängeln des Porzellanisolators vermutlich zusammen mit der Art seiner Befestigung. Abhilfemassnahmen werden angegeben. Im übrigen lässt sich aus der Wandlerstatistik auf eine ausreichende Betriebssicherheit schliessen. Wesentliche Gesichtspunkte der Qualitätssicherung, des Betriebes und des Unterhalts werden behandelt, und es wird mit einem Ausblick auf zukünftige Generationen von Messwandlern abgeschlossen.

De fréquents endommagements de transformateurs de mesure ont conduit à une recherche approfondie de leurs causes, une insuffisance du système de fermeture de l'huile et des défauts de l'isolateur en porcelaine, probablement en relation avec son mode de fixation. Des moyens pour y remédier sont indiqués. La statistique des transformateurs de mesure montre toutefois que leur sûreté est suffisante. Les auteurs traitent des points essentiels de l'assurance de la qualité, du service et de l'entretien, puis donnent un aperçu des futures générations de ces transformateurs.

1. Einleitung

In den letzten Jahren traten bei einigen schweizerischen Elektrizitätswerken überdurchschnittlich viele Wandlerdefekte vorwiegend an 150- und zum Teil auch an 220-kV-Messgruppen auf. Dabei kam es verschiedentlich zu Wandlerexplosionen. Solche Störungen haben nicht nur betriebliche Schwierigkeiten und finanzielle Konsequenzen zur Folge, sondern bedeuten in jedem Falle auch eine potentielle Gefährdung von Personen mit allen sich daraus ergebenden menschlichen und rechtlichen Problemen. Die durch die Defekte entstandene Verunsicherung bei vielen Betreibern solcher Apparate und die Forderung nach genauer Abklärung der Ursachen waren deshalb verständlich.

In dieser Situation gelangte im Dezember 1978 der Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE) auf Anregung einiger Mitglieder mit einer Umfrage über Wandlerausfälle an die Besitzer von Hochspannungsanlagen mit Systemspannungen über 100 kV. Die zahlreichen Antworten bewiesen das grosse Interesse der Mitglieder an der ganzen Problematik. Es zeigte sich jedoch, dass zur Bearbeitung des gesamten Fragenkomplexes eine Mitarbeit der Hersteller und eine fachliche Abstützung unbedingt notwendig waren. Aus diesem Grunde befasste sich das FK 38 des CES mit der Angelegenheit und beschloss die Einsetzung einer Arbeitsgruppe. Diese setzte sich an ihrer ersten Sitzung vom 12. Juni 1979 im wesentlichen folgende Ziele:

- Bereitstellung einer umfassenden Schadenstatistik der in der Arbeitsgruppe vertretenen Elektrizitätswerke und Hersteller unter Einbezug der VSE-Umfrage als Grundlage für die weiteren Untersuchungen. Feststellung der Schadenarten und deren Gewichtung.
- Störungsanalysen, Feststellen der Störungsursachen, Vorschläge für Abhilfemassnahmen
- Empfehlungen für vorbeugenden Unterhalt und Betriebskontrollen unter Berücksichtigung der heute existierenden Wandlertypen, Suche nach gefährdeten Wandlern
- Überlegungen zur Lebenserwartung von Messwandlern, zu deren geplanter Einsatz- und Lebensdauer und zur Sicherstellung dieser Werte
- Beurteilung der Bauarten von Messwandlern (Ölabschlusssysteme, Dimensionierung, Explosionssicherheit, Materialauswahl, neue Isolierflüssigkeiten usw.)
- Behandlung der Qualitätssicherung und der Fertigungskontrollen im besonderen mit kritischer Beurteilung und Koordination der verschiedenen einschlägigen Vorschriften und Empfehlungen
- Einsatz von Wandlerprüfgeräten für Abnahmen und Betriebskontrollen, Zukunftswünsche (z. B. TE-Messungen im Betrieb)
- Überblick über die Einbaubedingungen im Netz und die sich daraus ergebenden Folgerungen.

[1]) Mitglieder dieser Arbeitsgruppe und an diesem Bericht beteiligt sind: *W. Erb*, BBC Baden (Protokoll), *G. Gertsch*, Micafil AG Zürich, *H. Hartmann*, NOK Baden, *P. Jaisli*, ATEL Olten, Dr. *R. Minkner*, Emil Haefely & Cie. AG Basel und *H.-J. Vorwerk*, BKW Bern (Vorsitz).

Der Umfang dieser Zusammenstellung zeigt deutlich, dass es nicht möglich war, alle Problemkreise gleichzeitig und detailliert innerhalb nützlicher Frist zu bearbeiten. Anderseits ging es aber darum, die Anwender von Messwandlern raschestens über die wichtigsten allgemeinen Aspekte, über die Defektuntersuchungen und über die zu treffenden Sofortmassnahmen zur Verhinderung weiterer Explosionen zu informieren. Die ersten Resultate liegen jetzt vor und sollen im folgenden zusammengefasst einen vorläufigen Überblick geben.

2. Schadenstatistiken

2.1 Allgemeines

Zur Beurteilung der Betriebstüchtigkeit von Messwandlern sind die Störungen bzw. Schäden statistisch zu erfassen und zu verarbeiten, wobei auch der Vergleich mit anderen Betriebsmitteln unerlässlich ist. Wird den Dingen auf den Grund gegangen, so ist festzustellen, dass den statistischen Angaben, von einigen Ausnahmen abgesehen, bisher kaum einheitliche Definitionen zugrunde liegen [1]. Auch in der Schweiz hat man erst vor einigen Jahren die notwendigen Vorarbeiten begonnen, und die erste umfassende Störungsstatistik, bezogen auf das Jahr 1978, ist nun vor kurzem erschienen [2].

Zur Beurteilung der Störungsanfälligkeit von Messwandlern musste deshalb auf andere Angaben zurückgegriffen werden. Diese können lediglich Grössenordnungen aufzeigen und damit zur groben Orientierung dienen. Besonderheiten musste im einzelnen nachgegangen werden, und bei der Auswertung waren weitergehende Informationen mit zu berücksichtigen.

2.2 Induktive Messwandler

Tabelle I zeigt die Auswertung der zur VSE-Umfrage eingegangenen Antworten. Die jährliche Fehlerhäufigkeit wurde nach folgender Formel berechnet:

$$\lambda = \frac{\text{Anzahl der Schäden}}{\text{Anzahl Wandler} \times \text{Betriebsjahre}}$$

Internationalen Umfragen können Fehlerhäufigkeiten zwischen 0,1 und 0,8 % entnommen werden [1; 3]; eine in der Bundesrepublik Deutschland eingesetzte Arbeitsgruppe des VDE ermittelte Werte zwischen 0,02 und 0,03 % [4]. Im internationalen Vergleich liegen die VSE-Werte durchaus im Rahmen, während sie im Vergleich mit der VDE-Statistik um rund eine Grössenordnung höher liegen. Zu dieser Abweichung wurde festgestellt, dass die höheren schweizerischen Werte darin begründet sind, dass nicht nur schwere Schäden wie Explosionen und Isolationsdurchschläge gezählt wurden, sondern auch Ölverluste ohne weitere Folgeschäden (17 Wandler)

Schadenfälle an Messwandlern in der Schweiz (VSE-Umfrage vom Dezember 1978) Tabelle I

Art	Anzahl Wandler				Jährliche Fehlerhäufigkeit λ in %			
	Systemspannung in kV			Total	Systemspannung in kV			Total
	123...170	245	420		123...170	245	420	
Stromwandler	2/240/ 2800	1/174/ 3660	1/127/1440	4/ 541/ 7900	0,07	0,03	0,07	0,05
Ind. Spg.-Wandler	0/104/ 2350	4/ 97/ 1280	2/ 53/ 490	6/ 254/ 4120	0,00	0,31 [1])	0,41 [2])	0,15
Kap. Spg.-Wandler	0/ 12/ 200	1/ 56/ 1130	0/ 0/ 0	1/ 68/ 1330	0,00	0,09	–	0,08
Kombiwandler	19/526/ 5180	8/599/ 8310	0/ 0/ 0	27/1125/13490	0,37 [3])	0,10 [4])	–	0,20
Total	21/882/10530	14/926/14380	3/180/1930	38/1988/26840	0,20	0,10	0,16	0,14

[1])...[4]) vgl. Text.

Wandlerjahre
Stückzahl
Schäden

und äussere Ursachen (2 Wandler). Dazu kommt, dass in der VSE-Statistik auch ältere Messwandler bis zurück zum Baujahr 1951 enthalten sind, während die VDE-Arbeitsgruppe nur Wandler seit 1965 erfasste und die Statistik auf eine bedeutend grössere Anzahl Wandler abstützen konnte. Unter Berücksichtigung dieser Besonderheiten unterscheiden sich die Fehlerhäufigkeiten nur unbedeutend. Der ausserdem durchgeführte Vergleich mit Fehlerstatistiken einiger grösserer schweizerischer Elektrizitätswerke und verschiedener schweizerischer Hersteller, womit auch exportierte Messwandler erfasst wurden, bestätigte das Bild über die Fehlerhäufigkeiten in seinen Grundzügen.

Eine Fehlerhäufigkeit in der Grössenordnung von einigen Zehnteln Promille erlaubt die allgemeine Schlussfolgerung, dass es sich um zuverlässige Geräte handelt. Sie ist vergleichbar mit anderen Anlageteilen, wobei die Messwandler im grossen ganzen gesehen sogar günstiger abschneiden [1; 3]. Dies darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass die in Tabelle I unterstrichenen λ-Werte auffallen. Eine genauere Analyse ergab folgendes:

1) Zur Hauptsache fehlerhafte Dichtungen bei einer Gruppe von Wandlern und bei einer anderen Gruppe Gasbildung, vermutlich durch innere Teilentladungen. Bestimmte Isolationsteile wurden vorsorglich ersetzt.

2) Lediglich kleinere Undichtigkeiten.

3) Eine Gruppe von Wandlern wies Porzellanrisse auf, eine andere Gruppe explodierte.

4) Porzellanrisse und Explosionen, davon eine vermutlich durch Transportschaden hervorgerufen.

Die Schadenursachen wurden im einzelnen untersucht, wobei folgende schwerwiegende Mängel festgestellt wurden (vgl. Abschnitt 3):

1. Ungeeignetes Ölabschlußsystem im Zusammenhang mit einem bestimmten Wandlertyp.

2. Ungenügende mechanische Festigkeit von Porzellanisolatoren bestimmter Fertigungsserien zusammen mit der Art der Porzellanbefestigung.

Unerklärlich bleiben vereinzelte Ausfälle innerhalb einer Vielzahl sich bewährender Wandler des gleichen Typs und der gleichen Fabrikationsserie. Daneben handelte es sich um rechtzeitig erkannte kleinere Mängel, die relativ einfach behoben werden konnten, unter Umständen aber auch konstruktive Änderungen bedingten, aber nicht zu ungeplanten Abschaltungen im Sinne der Definition «Störungen» der VSE-Statistik führten. Auffallend ist die in der Fehlerhäufigkeit nicht aufgeführte relativ grosse Anzahl von Transportschäden.

2.3 Kapazitive Spannungswandler

Die VSE-Umfrage ist für kapazitive Spannungswandler aufgrund der geringen Stückzahlen und Wandlerjahre nicht sehr aussagefähig. Der einzige Fall eines Defektes betrifft einen 220-kV-Wandler und ist primär auf eine Undichtigkeit des Kondensators zurückzuführen. Der erwähnte Wandler explodierte, da die Kondensatorwickel infolge fehlenden Öls nacheinander durchschlugen. Dieser Fall ist jedoch als Ausnahme zu betrachten, wie die Fehlerstatistik der schweizerischen Hersteller mit grösserem Anteil exportierter Wandler gezeigt hat. Aus dieser Statistik ist klar ersichtlich, dass schwere Schäden (wie z.B. Explosionen) dank der sehr hohen Zuverlässigkeit des kapazitiven Spannungsteilers äusserst selten sind. Die dielektrischen Schäden sind hauptsächlich im induktiven Teil oder im Ferroresonanzschutz aufgetreten. In den meisten Fällen hat dies nicht zu einem Betriebsunterbruch, sondern nur zu Störungen im Messkreis geführt, da der Kondensatorteil noch die volle Spannung aushalten konnte.

3. Besondere Probleme mit Messwandlern, Sofortmassnahmen

3.1 Analyse der Wandlerausfälle

Die Ausfälle der Messwandler führten zu einem intensiven Meinungsaustausch zwischen den Betreibern und dem Hersteller. Werden Ursachen für Ausfälle ausgeschieden, die nicht in der Konzeption des Wandlers liegen, wie Überspannungen durch atmosphärische Einwirkungen, Ferroresonanz, Alterung und äussere Einflüsse, so zeigt sich, dass besonders Kombiwandler einer modernen Konstruktion mit den Systemspannungen 123...170 kV nicht die normale Zuverlässigkeit aufwiesen. Auch war es eigentümlich, dass diese Wandler meistens in der ersten Jahreshälfte ausfielen.

Die Konzeption des Wandlers ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet: Kombiwandler; Stromwandler im Kopf (oben) des Kombiwandlers angeordnet; Spannungswandler in der Mitte angeordnet; Ölabschlußsystem: Stickstoffpolster auf dem Ölspiegel zur Aufnahme der Ölausdehnungen in Abhängigkeit der Temperatur mit einer starren Haube (Fig. 1).

3.2 *Überprüfung der Wandlerkonzeption*

Die ausgefallenen Kombiwandler gaben keinen Hinweis, ob Spannungs- oder Stromwandler versagt haben. Es wurden daher die Entwurfsdaten überprüft, d.h. die Ausnutzung des Dielektrikums. Dabei wurden folgende Feldstärken kontrolliert: an den Lagenrändern des Spannungswandlers, zwischen den Lagen der Hochspannungswicklung und in der Isolation des Kopfstromwandlers. Die berechneten Feldstärken lagen in ähnlicher Höhe wie bei älteren Konstruktionen, die sich bestens bewährt hatten.

Eine andere Möglichkeit musste ebenfalls ausgeschieden werden, nämlich die, dass die Wandler mit zu hohen Teilentladungswerten das Werk verlassen haben, da bereits zu jenem Zeitpunkt empfindliche Störspannungsmessungen durchgeführt wurden. Die Messwandler wurden nur ausgeliefert, wenn die Teilentladungswerte eine vorgeschriebene Höhe nicht überschritten und nur unwesentliche Änderungen vor und nach der Prüfung zeigten. Die Höhe der Messwerte hat sicher einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Wandler. Durch Festlegung eines oberen Teilentladungswertes [5] für die heute hergestellten Messwandler wird eine gleichmässigere Qualität erreicht.

Die Wiederholung der Wechselspannungsprüfung zeigte keine Abnahme der elektrischen Festigkeit, und dies auch nicht bei 20% höheren Prüfwerten und einer Dauer von 10 min. Es wurden jedoch bei den Nachkontrollen Wandler ausgeschieden, deren Teilentladungswerte nicht den SEV-Normen [5] entsprachen.

Durchgeführte Ölmessungen zur Beurteilung der elektrischen Eigenschaften $\tan\delta = f(\vartheta)$, $\tan\delta = f(U)$ und der Durchschlagsfestigkeit brachten keine Hinweise.

3.3 *Die elektrische Festigkeit von Ölspalten und ihre Auswirkungen auf die Ölpapier-Isolation von Stromwandlern*

Einen entscheidenden Hinweis auf die Fehlerursache ergaben frühere Untersuchungen [6]. In dieser Arbeit wurde unter anderem die Ionisations-Einsatzspannung bzw. -feldstärke von Ölspalten in Abhängigkeit des Druckes und des Ölzustandes – entgast oder gasgesättigt – angegeben. In einer im Hinblick auf die Wandlerschäden durchgeführten Versuchsserie wurde für eine Reihe von Isolierölen (Shell Diala C, Shell Diala D, Esso Univolt 33 und Polyectrene D 100), gebraucht und ungebraucht, entgast und gasgesättigt, die TE-Einsatzspannung als Funktion des Druckes gemessen. Einige Resultate zeigt die Darstellung in Figur 2.

Das synthetische Isolieröl Polyectrene D 100 verhält sich im Vergleich mit den Mineralölen gleichwertig oder besser.

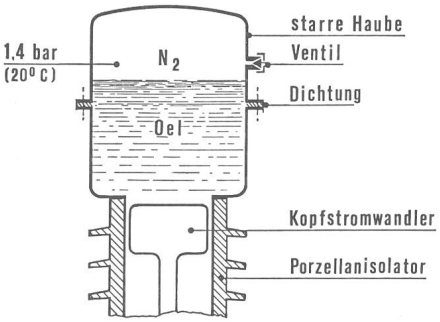

Fig. 1 Ölabschlußsystem des Kombiwandlers

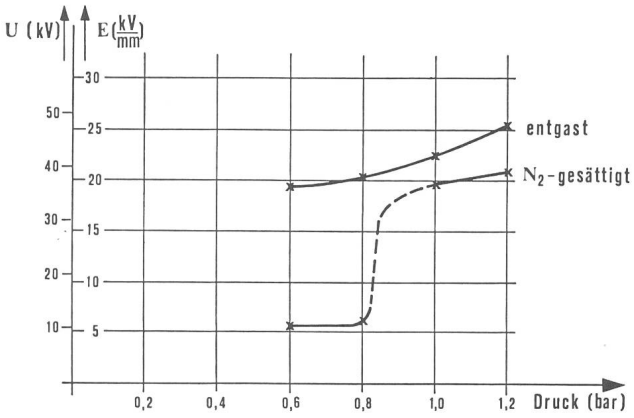

Fig. 2 TE-Einsatzspannung bzw. TE-Einsatzfeldstärke in Abhängigkeit des Druckes für Ölspalte von 1 mm

Die Versuche wurden mit isolierten Elektroden durchgeführt, und die Werte für die Spannung und Feldstärke wurden auf den gemessenen Ölspalt von 1 mm umgerechnet

Entgaste Öle zeigten im Druckbereich von 1,0 bar (Atmosphärendruck) ...0,8 bar (Unterdruck) einen leichten Rückgang der TE-Einsatzspannung von ca. 10%. Bei mit Stickstoff gesättigten Ölen erfolgte bei 0,8 bar ein starkes Absinken der TE-Einsatzspannung um mehr als 60%. Im Überdruckbereich von 1,2 bis 1,0 bar war nur eine leichte Abnahme der TE-Einsatzspannung messbar.

Die erwähnten Spannungsprüfungen an den Kombiwandlern ergaben, dass nur der Stromwandlerteil davon betroffen war, wenn unzulässig hohe Teilentladungswerte auftraten. Der Trocknungsprozess der Isolation erzeugt im Dielektrikum Spalte von 0,5...2 mm. Diese Spalte besitzen je nach Dicke unterschiedliche elektrische Festigkeiten, so dass je nach Spaltgrösse im Stromwandlerteil des Kombiwandlers Glimmentladungen einsetzen können, wenn über dem Isolieröl ein Unterdruck vorhanden ist. Dies schwächt die Isolation und führt anschliessend zur Zerstörung des Wandlers.

Da es keine absolut dichten Gassysteme gibt, kann in 5 bis 10 Jahren der Druck des Stickstoffpolsters von 1,4 auf 1 bar absinken, wenn keine periodische Überprüfung stattfindet. Bei tiefen Temperaturen, im Herbst und Winter, steht dann das Isolationssystem unter Unterdruck. Kontrollmessungen des Druckzustandes ergaben, dass eine grosse Anzahl von Wandlern tatsächlich Unterdruck aufwiesen.

Die Streuung der Grösse der Ölspalte und die unterschiedlichen Leckraten des Stickstoffabschlußsystems erklären, warum die Isolation von Wandlern der gleichen Serie unterschiedlich gefährdet ist.

3.4 *Allgemeine Beurteilung von Messwandlerkonstruktionen mit Stickstoffpolster*

Da die TE-Einsatzspannung in Ölspalten von deren Grösse und vom Ölzustand (entgast oder gasgesättigt) abhängig ist, lassen sich über die Empfindlichkeit des Ölpapierdielektrikums von magnetischen Spannungs- und Stromwandlern mit Stickstoffabschluss und starrer Haube hinsichtlich der Betriebszustände mit Unterdruck folgende Aussagen machen:

a) Spannungswandler. Lagenwicklungen mit Barrierenkonstruktion (definierte Ölspalte) sind praktisch nicht empfindlich gegen auftretende Unterdrücke.

b) Topf- oder Kesselstromwandler sind kaum empfindlich gegen Druckabsenkung, da die Ölsäule einen gewissen Druck aufrechterhält.

c) Kopfstromwandler sind am stärksten gefährdet, da das Ölpapierdielektrikum direkt der Druckabsenkung unterworfen ist.

d) Kombinationen aus a und b verhalten sich wie b.

e) Kombinationen aus a und c verhalten sich wie c.

Damit für auftretende Überspannungen im Betrieb eine ausreichende Sicherheitsmarge gegeben ist, sollte der Druck bei allen Konstruktionen an der höchstbeanspruchten Stelle bei keiner Betriebstemperatur unter 1 bar absinken.

3.5 Sofortmassnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit

Bei starrem Abschluss mit Stickstoffpolster sind Druckkontrollen notwendig. Eine jährliche periodische Kontrolle des Druckzustandes des Stickstoffabschlusses bei ungefähr gleicher Umgebungstemperatur ist unerlässlich. Aus den Messwerten ergeben sich die in Tabelle II angegebenen Hinweise. Ferner drängt sich der Einbau eines geeigneten Kontrollmanometers auf. Ein derartiges Instrument wird bisher besonders in den USA und der BRD verwendet.

Der hermetische Abschluss ohne Stickstoffpolster, also mit dem positiven Metallfaltenbalg oder mit einem Elastomerfaltenbalg, erlaubt über die Balgstellung Hinweise auf den Betriebszustand des Wandlers (Tab. III).

3.6 Porzellanschäden

Bei Isolatoren für Messwandler bestimmter Fertigungsjahre und -serien sind Porzellanrisse aufgetreten. Es ist anzunehmen, dass die Ursache in der Isolatorherstellung zu suchen ist, wobei nicht auszuschliessen ist, dass die Mängel im Porzellan je nach der Lösung der Isolatorbefestigung am Fuss und Kopf des Wandlers mehr oder weniger stark zum Vorschein kommen. Bei den üblichen Rundgängen durch die Anlagen sollte vermehrt auf Ölleckagen am Isolator geachtet werden, damit rechtzeitig vor grösseren Isolierölverlusten eingegriffen werden kann.

Tabelle II

Nr.	Druckwerte	Ergebnis und Massnahmen
a1.	1. Druck konstant gegenüber letztjähriger Messung und 2. Überdruck entspricht der Angabe des Herstellers	Wandler in Ordnung
a2.	1. Druck ist gegenüber letztjähriger Messung abgesunken und 2. Druck entspricht Atmosphärendruck	1. Abschlußsystem undicht. 2. Dichtung und Füllventile überprüfen, 3. Gas nachfüllen und 4. Wandler nach einem halben Jahr kontrollieren
a3.	Druck ist über den vom Hersteller angegebenen Überdruck – verglichen mit der letztjährigen Messung – angestiegen	1. Wandler ist gefährdet. 2. Ausser Betrieb nehmen, 3. Hersteller unterrichten, 4. Gasanalysen und 5. TE-Messung

4. Qualitätssicherung in Konstruktion und Fertigung von Messwandlern

Bedingt durch den Einfluss von Faktoren verschiedenster Art auf die Produktequalität, wie beispielsweise steigende Materialausnützung, engere Toleranzen, Preisdruck und Leistungsdruck, hat sich nahezu überall die Überzeugung durchgesetzt, dass nur durch ein effizientes Qualitätssicherungssystem die erwartete und heute auch übliche hohe Betriebssicherheit der in der Schweiz eingesetzten Messwandler erhalten werden kann oder sich gar noch verbessern lässt. Die früher übliche Qualitäts*kontrolle* (meist nur während und am Ende des Fertigungsablaufs) musste deshalb zu einem umfassenderen System, dem Qualitäts*sicherungssystem*, ausgebaut werden [8]. Ausgehend von der Erkenntnis, dass die Qualität nicht nur von der Fertigung abhängt, sondern bereits in der Konzeption der Wandler liegt (Fig. 3), muss die Qualitätssicherung bereits in einem sehr frühen Stadium einsetzen. Der erwähnte Schadenschwerpunkt im Ölabschlußsystem fällt z. B. darunter.

Die richtige Wandlerkonzeption muss durch über die üblichen Typen- und Stückprüfungen hinausgehende Untersuchungen bestätigt werden. Als Beispiele solcher weitgehender Untersuchungen seien erwähnt: Öluntersuchungen, Feldstärkenberechnungen, Temperaturverhalten von Dichtungen, Abklärungen über Transportverhalten usw. Ein möglicherweise in der Konzeption noch zuwenig berücksichtigter Einflussfaktor ist der im Betrieb vorkommende Temperaturbereich z. B. auf das Teilentladungsverhalten.

Tabelle III

Nr.	Balgstellung	Ergebnis und Massnahmen
c1.	Alle Wandler im gleichen Feld ca. gleiche Balgstellung	Wandler in Ordnung
c2.	Balgstellung bei ca. 20 °C ungefähr in der Mitte zwischen der min. und max. Stellung	Wandler in Ordnung
c3.	Stark unterschiedliche Balgstellung bei einer gleichen Baureihe im gleichen Feld	1. Hersteller sofort unterrichten und 2. Wandler laufend beobachten, evtl. abschalten
c4.	Balg in der minimalen Stellung	1. Wandler auf Ölverluste kontrollieren und 2. Hersteller unterrichten
c5.	Balgstellung ist nicht von der Temperatur abhängig	1. Abschlußsystem ist undicht oder 2. Balg verklemmt 3. Hersteller unterrichten
c6.	Balgstellung über der maximal zulässigen Grenze	1. Überdruck im Wandler durch Gasbildung infolge von Teilentladungen 2. Wandler sofort ausser Betrieb nehmen und 3. Hersteller unterrichten

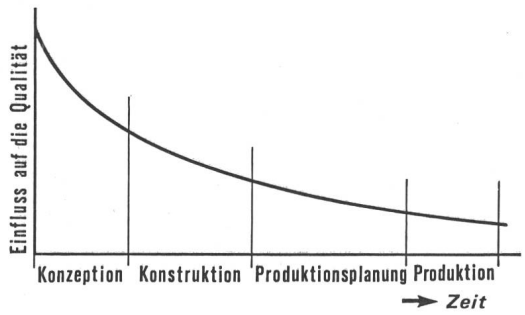

Fig. 3 Beeinflussungsmöglichkeit der Qualität im Laufe der Entwicklung eines Apparates

Erst nach Sicherstellung, dass die vorgesehene Konzeption geeignet ist, um einen qualitativ hochstehenden Messwandler herzustellen und auch viele Jahre zu betreiben, kann es an die praktische Konstruktion gehen. Hier greift die Qualitätssicherung in der Weise ein, dass die Möglichkeiten, verlangte und unerlässliche Eigenschaften auch kontrollieren zu können, bewusst geschaffen werden. Beispielsweise ist es nicht a priori selbstverständlich, dass gewisse Abmessungen auch kontrolliert werden können. Es ist daher geradezu zwangsläufig, den für die spätere Fabrikation benötigten Prüf- oder Inspektionsplan bereits parallel zur Entwicklung eines fabrikationsgerechten Prototyps zu erstellen. Selbstverständlich muss dieser Prototyp die nach den einschlägigen Vorschriften vorgeschriebenen Prüfungen mit ausreichender Sicherheitsmarge bestanden haben, bevor an eine endgültige Aufnahme ins Fabrikationsprogramm gedacht werden kann.

Wird vom Kunden ein Auftrag an einen Messwandlerhersteller vergeben, so muss dieser dafür besorgt sein, dass die Kundenwünsche fehlerfrei und eindeutig in die beim Hersteller üblichen Arbeitspapiere übertragen werden. Hier kann oft eine einfache Rückfrage des Herstellers beim Kunden viel dazu beitragen, unterschiedlich interpretierbare Forderungen klarzustellen oder als selbstverständlich vorausgesetzte Eigenschaften erstmals herauszuschälen. All dies bedarf eines genau geregelten Arbeitsablaufs mit eindeutig vorgeschriebenen Kontrollen, die heute meist über die bekannte Zeichnungskontrolle hinausgehen. In diesen Bereich gehört auch ein funktionierendes und kontrollierbares Änderungswesen, das gewährleisten muss, dass jeder Beteiligte jederzeit mit auf neuesten Stand gebrachten Arbeitsunterlagen arbeitet.

Auf die bekannten Fabrikationskontrollen bei der eigentlichen Fabrikation sei nur der Vollständigkeit halber noch hingewiesen. Doch auch hier hat sich gezeigt, dass nicht nur die effektive Durchführung der Kontrolle, sondern auch ihre Protokollierung in Prüfprotokollen oder Checklisten unumgängliches Hilfsmittel zur Hebung der Wandlerqualität darstellen.

Die Endprüfung im Werk soll abschliessend die sachgemässe Fabrikation unter Beweis stellen und auch die Betriebstüchtigkeit demonstrieren. Als Beweis, dass diese Prüfung helfen kann, die Betriebssicherheit zu erhöhen, ist die seit mehr als 10 Jahren etablierte Teilentladungsmessung zu werten. Sie wurde damals aus rein qualitätsbezogenen Erwägungen eingeführt, obwohl die zugehörigen Prüfvorschriften noch gänzlich fehlten. Ihre Notwendigkeit und Nützlichkeit zum Erreichen geringer Ausfallquoten ist bei Messwandlern heute unumstritten.

Weitergehend im Ablauf ist es heute üblich, sich vor der Inbetriebnahme des Wandlers der Unversehrtheit durch den Transport und die Montage durch eine Inbetriebnahmekontrolle zu versichern.

Das Schwergewicht des heutigen Qualitätssicherungssystems liegt wohl in dem Wort «geplant». Dies schliesst bereits auch ein, dass das System selbst jederzeit kontrollierbar wird, indem es schriftlich vorliegen muss.

Alle schweizerischen Messwandlerhersteller verfügen heute über ein bis zu einem gewissen Grad schriftlich dokumentiertes Qualitätssicherungssystem. Die schriftliche Dokumentation in Form von Qualitätsbüchern, Qualitätssicherungsverfahren, Inspektionsplänen, Checklisten usw. hat neben dem Hauptzweck der Festlegung der Massnahmen zur Erreichung eines hohen Qualitätsniveaus auch den Vorteil, dem Abnehmer die Bemühungen aufzuzeigen, die heute auf Herstellerseite ergriffen werden, um die Ausgangslage für geringe Ausfallquoten zu schaffen. Weiter wird es dem Abnehmer leichter ermöglicht, sich über die heute noch weit verbreitete Abnahmeprüfung hinausgehend über die Wirksamkeit, Vollständigkeit und den Anwendungsgrad der beschriebenen Qualitätssicherungsmassnahmen ein vergleichendes Bild von den Messwandlerherstellern zu machen. Einige Abnehmer gehen in dieser Richtung bereits so weit, dass sie potentielle Lieferanten vor Auftragserteilung zur systematischen Kontrolle des Qualitätssicherungssystems – den sogenannten Audits – besuchen. Ob dieses nicht gerade billige Vorevaluationsverfahren auch bei Messwandlern notwendig ist, kann durch die nachgewiesene hohe Zuverlässigkeit nicht untermauert werden. Innerbetriebliche, durch unabhängige Stellen vorgenommene Audits sind jedoch sicher notwendig, um systematische Schwachstellen eher zu entdecken und Korrekturmassnahmen losgelöst von jeglicher Auftragsabwicklung kontrollieren zu können. In logischer Fortsetzung der Bemühungen zur Transparenz der Qualitätsbemühungen gehört es dann auch, die Qualität der Unterlieferanten zu bewerten.

Wenn auch heute der gesamte Entwicklungs- und Fabrikationsablauf im Hinblick auf hohe «Qualität» durchsichtiger und damit auch kontrollierbarer ist, so ist und muss nach Ansicht der Arbeitsgruppe die Schlussprüfung im Werk ein gewichtiger Schwerpunkt aller Kontrollen bleiben. Der Abnehmer sollte ihr daher speziell bei für ihn wichtigen Wandlern beiwohnen.

Alle Qualitätsbemühungen der Hersteller müssen jedoch so lange Stückwerk bleiben, als nicht eine Rückführung gewonnener Betriebserfahrungen in neue Wandlergenerationen erfolgt. Gerade hier ist der Anwender aufgefordert, das Seine beizutragen, indem er Mängel, Beobachtungen und Verbesserungsvorschläge den Herstellern bekanntgibt; dies setzt jedoch ein Vertrauensverhältnis zwischen den Partnern voraus, ohne das ganz generell keine Weiterentwicklung leben kann.

5. Betriebsbedingungen und Unterhalt

5.1 Betriebsbedingungen

Die üblichen Einbauorte der Strom- und Spannungswandler in den Hochspannungsanlagen zeigt Figur 4. Bei den *Linienfeldern* wird heute in Kompakt- und SF_6-Anlagen der Linientrennschalter teilweise weggelassen. In Freiluftanlagen mit vollem Isolationsniveau ist in diesen Feldern aus wirtschaftlichen Gründen der Überspannungsschutz durch Überspan-

nungsableiter in der Regel nicht üblich. In Anlagen mit Systemspannungen von 50 bis 245 kV sind häufig Kombiwandler anzutreffen.

In den *Transformatorfeldern* kann je nach Aufbau des Netzschutzes und der Spannungsregulierung auf einzelne Wandler verzichtet werden. Heute werden zum Schutz der kostspieligen Transformatoren in den meisten Anlagen auf deren Ober- und Unterspannungsseite Überspannungsableiter vorgesehen, welche auch den Messwandlern einen einwandfreien Schutz bieten. Messwandler sollten nicht direkt an die Sammelschienen angeschlossen werden, weil dort auftretende Wandlerdefekte bei vorhandenem Sammelschienenschutz die Abschaltung aller angeschlossenen Felder und ohne diesen Schutz zahlreiche Schalterauslösungen in benachbarten Stationen verursachen können.

Eine kurzgefasste Übersicht über die Beanspruchung der Netzteile befindet sich in [9]. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass Messwandler, deren Prüfspannungen diesen Koordinationsregeln entsprechen, kaum noch gefährdet sind. Dies dürfte folgende Gründe haben:

– Empfindliche Teilentladungsmessungen gehören heute zu den Stückprüfungen.

– Alle Wandler werden heute stoßspannungsfest gebaut und typengeprüft.

– Dank den neuen, kaltgewalzten Blechen wird die Überspannung beim Abschalten leerlaufender Transformatoren niedrig gehalten. Die nach Fig. 4b meistens eingebauten Überspannungsableiter kommen dabei nicht zum Ansprechen.

– Beim Abschalten langer leerlaufender Leitungen wird deren Ladung von den magnetischen Linien-Spannungswandlern, deren Hochspannungswicklung einseitig geerdet ist, vor Ablauf einer Periode vollständig abgeleitet. Somit treten bei den üblichen Wiedereinschaltzeiten nur unbedeutende Überspannungen auf. Sind demgegenüber kapazitive Spannungswandler eingebaut, so müssen die eventuell entstehenden höheren Überspannungen berücksichtigt werden.

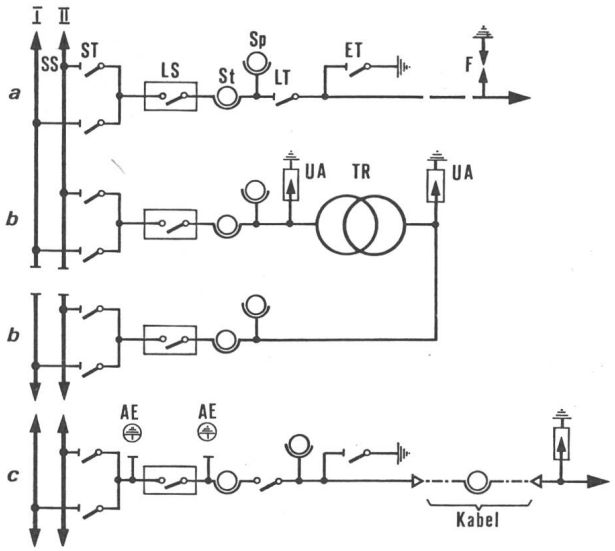

Fig. 4 Einbauorte der Messwandler in Schaltanlagen

a Linienfeld einer Freiluftanlage
b Transformatorfeld
c Linienfeld einer SF_6-Anlage

SS Sammelschienen
ST Sammelschienentrennschalter
LS Leistungsschalter
LT Linientrennschalter
ET Erdungstrennschalter
F Schutzfunkenstrecke
St Stromwandler
Sp Spannungswandler
Tr Transformator
} evtl. Kombiwandler
UA Überspannungsableiter
AE Arbeitserder

Besondere Beachtung erfordern in Figur 4a Resonanzerscheinungen bei geöffnetem Leistungsschalter und Linientrenner, und zwar zwischen der Seriekapazität der Steuerkondensatoren der Leistungsschalter und der Induktivität der Spannungswandler. Beim Zuschalten der Transformatoren nach Figur 4b können ferner auf der Unterspannungsseite an den Spannungswandlern mit geerdeten Hochspannungswicklungen gefährliche Ferroresonanzerscheinungen (Kippschwingungen) auftreten, sofern die Transformatorwicklung auf dieser Seite nicht geerdet ist. Eine wirksame Abhilfe gegen diese Schwingungen bringt beispielsweise die Dreieckschaltung von separaten Sekundärwicklungen der Spannungswandler aller drei Phasen, wobei das in einem Punkt offene Dreieck mit einem Widerstand beschaltet wird, oder das Erden des Transformatorsternpunktes über einen hochbelasteten Spannungswandler.

Auch an stoßspannungsfesten Spannungswandlern sollten die Überspannungen, die beim Ein- und Ausschalten der relativ langsamen Trennschalter entstehen, nach Möglichkeit durch Schalten mit dem Leistungsschalter vermieden werden. Ist nach Fig. 4a der Leistungsschalter offen, der Linientrennschalter eingelegt und die Leitung von der Gegenseite zugeschaltet, so entsteht an den Messwandlern durch den Ferrantieffekt eine erhöhte Betriebsspannung. Wird dann die Leitung von einem Blitzschlag getroffen, so sind wegen der Reflexion der Wanderwelle am Leitungsende die Messwandler ohne Ableiterschutz gefährdet. Zudem besteht die Gefahr, dass Überschläge über den geöffneten Leistungsschalter auftreten. Normalerweise entspricht die Festigkeit über dem geöffneten Schalter derjenigen gegen Erde. Die Eigenkoordination von Trennschaltern, die über die geöffnete Trennstrecke höher als gegen Erde isolieren, fehlt somit bis heute in den Regeln für Leistungsschalter. Dies kann bei geschlossenem SS-Trenner und Überschlag über den Leistungsschalter zur Sammelschienenstörung führen. In Linienfeldern ohne Überspannungsableiter ist es daher erforderlich, richtig koordinierte und möglichst polaritätsunabhängige Schutzfunkenstrecken einzubauen. Aus folgenden Gründen sind diese Funkenstrecken vorzugsweise auf der Leitung ein bis zwei Spannweiten vor der Schaltanlage vorzusehen:

– Lichtbögen an Funkenstrecken, die an Messwandlern angebaut sind, könnten diese oder auch den in der Nähe aufgestellten Leistungsschalter schwer beschädigen.

– Die Impedanzen zwischen dem Mast und den Anlageapparaten verkleinern die Steilheit der einlaufenden Wanderwelle (abgeschnittener Stoss).

– Erdschlüsse auf der Leitung werden von den Linienschaltern abgetrennt; dabei sind bei vermaschten Netzen keine schwerwiegenden Störungen zu erwarten.

5.2 Unterhalt der Messwandler

Die bei den höheren Systemspannungen allgemein übliche wirksame Erdung hat bei Störungen hohe Erdschlußströme zur Folge. Fliessen diese Ströme im Innern der Apparate, so können sie grosse thermische Zerstörungen verursachen, d.h. ölgefüllte Messwandler explodieren. Dabei gefährden die Splitter der Isolatoren u.U. Personen und die umliegenden Anlageteile. Ein einwandfreier Unterhalt mit weitgehenden periodischen Kontrollen soll solche Störungen nach Möglichkeit vermeiden und ist daher sehr zu empfehlen. Auch sind diesbezüglich die Betriebs- und Unterhaltsvorschriften der Hersteller genau zu beachten.

In der Schweiz wird allgemein ein vorbeugender Unterhalt mit dynamischer Komponente praktiziert. D.h., neben vorbeugenden Massnahmen werden bei Störungsfällen weitere gezielte Massnahmen ergriffen.

a) Wöchentliche Kontrollen

a.1) Dichtheit: Visuell zu prüfen sind Ölstand, Dichtungen, insbesondere an den unteren Wandlerteilen sowie Ölflecken am Porzellan, evtl. von Haarrissen herrührend. Sinkt der Ölstand, so ist die elektrische Festigkeit im Innern des Wandlers nicht mehr gewährleistet. Auch kann bei Undichtheit Feuchtigkeit eindringen. Öflecken sind bei trockenem Apparat dunkel, bei Regen erkennt man schimmernde Farben. An unteren Teilen undichte Wandler sind raschmöglichst auszuwechseln.

a.2) Abschluss am Wandlerkopf: Hochspannungswandler haben verschiedene Abschlüsse: Bei alten Wandlern findet man noch die *Luftentfeuchter* mit Silicagelfüllung. Die Farbe dieser Füllung ist zu kontrollieren, und bei Rot/Weiss-Verfärbung ist das Trocknungsmittel auszuwechseln. Der zu tiefe Ölstand zeigt eine allgemeine Ölleckage, der zu hohe das Eindringen von Wasser an. Beides erfordert Massnahmen.

Beim *ölgefüllten Faltenbalg* aus Metall oder Elastomer zeigt der zu tiefe Balgstand eine allgemeine Ölleckage oder aber eine Undichtheit des Balges an. (Vgl. Abschnitt 3.5)

Der Atmungsbalg ist mit einem *Gaspolster* über dem Ölspiegel aufgefüllt. Hier können die Funktionstüchtigkeit und das Vorhandensein von Leckagen am Wandler oder Balg an einem Balg-Stellungsanzeiger kontrolliert werden.

Beim *Gasabschluss ohne Ausdehnungsmöglichkeit* sind die Druckmessgeräte soweit vorhanden abzulesen. Die in Abhängigkeit der Aussentemperatur vorgeschriebenen Druckwerte (Betriebsvorschrift) dürfen nicht unterschritten werden. (Vgl. Abschnitt 3.5)

a.3) Verfärbungen der Primäranschlüsse können durch Überhitzung (evtl. schlechte Kontaktgabe) erfolgen. Unter Umständen genügt das Nachziehen der Schraubverbindungen.

b) Jährliche Kontrollen

(b.1 während des Betriebes, b.2...b.5 bei abgeschalteten und geerdeten Messwandlern)

b.1) Stromtragfähigkeit der Anschlüsse und Umschaltvorrichtungen: Messung der Temperaturen an den primären und sekundären Anschlüssen und Umschaltstellen sowie an den Erdanschlüssen, vorzugsweise durch Thermovisionsmessungen.

b.2) Korrosionen: Alle rostenden Metallteile sind zu entrosten und neu zu streichen.

b.3) Schraubenkontrollen: Die Schrauben sind auf Festsitz zu kontrollieren und wenn erforderlich nachzuziehen (zulässige Drehmomente beachten).

b.4) Oberflächenreinigung der Isolatoren: Alle Isolierteile sind zu reinigen. Nur in extremen Fällen wird es in der Schweiz erforderlich sein, eine weitere Oberflächenbehandlung der Hochspannungsisolatoren, z.B. mit einem Silikon-Auftrag, vorzunehmen. Unter Umständen muss dieser Belag periodisch vollständig entfernt und neu aufgetragen werden.

b.5) Hilfseinrichtungen: An Messwandlern mit Gasabschlüssen ohne Ausdehnungsmöglichkeit sind die Druckmesseinrichtungen mit Hilfe von Eichinstrumenten zu überprüfen. Gasschutzvorrichtungen sind mit Druckluft bis zur richtigen Alarmgabe zu kontrollieren.

c) Kontrollen nach einigen Jahren

Für Hochspannungsmesswandler wird vorwiegend mit Isolieröl imprägnierte Papierisolation verwendet. Auch bei dichten Abschlüssen zeigen sich Alterungserscheinungen, welche durch Ausscheiden von Wasser aus dem Papier oder von weiteren Baustoffen, die das Isolieröl chemisch ungünstig beeinflussen, herrühren. Damit kann die Durchschlagfestigkeit oder die Stabilität (Wärmedurchschlag) der Isolation ungünstig beeinflusst werden. Bei letzterer wirken sich allerdings die im Betrieb normalerweise tiefen Wandlertemperaturen günstig aus. Überspannungen können Teilentladungen zünden, was bei dauernder Einwirkung zur Zerstörung der Isolation führen kann. Alle diese Erscheinungen ergeben physikalische und chemische Veränderungen des Isolieröles. Folgende Messungen geben darüber Auskunft: Durchschlagsfestigkeit, Wassergehalt, Neutralisationszahl (Bildung von Säuren), Verlustfaktor tan δ bei 90 °C (thermische Stabilität der Isolation), Gasgehalt (Isolieröl hat die Fähigkeit, Gase aufzunehmen. Die im Öl gelösten Gasarten lassen beispielsweise auf Teilentladungen im Öl, in der Isolation oder auf ungenügende Kontakte schliessen).

Der SEV hat bereits früher Richtlinien über die Pflege der in Transformatoren und Messwandlern hoher Spannung verwendeten Isolieröle herausgegeben, die heute noch volle Gültigkeit besitzen. In Tabelle IV von [10] sind die zu empfehlenden Grenzwerte und die Kontrollintervalle bei Stichprobenmessungen eingetragen. Zudem enthält dieser Artikel Angaben über die Ölentnahme. Wird einer der vorgeschriebenen Grenzwerte überschritten, so muss in der Anlage oder beim Wandlerfabrikanten die Wandlerisolation durch Verlustfaktor- und TE-Messungen kontrolliert werden. Auf Grund dieser Kontrollmessungen kann entschieden werden, ob der Messwandler noch betriebsfähig ist und ob an allen Apparaten des gleichen Typs nur das Isolieröl oder auch die Wandlerisolation zu überprüfen ist.

5.3 Kontrollen nach Transporten

Es hat sich gezeigt, dass häufig Transportschäden auftreten. Es ist daher zu empfehlen, nach jedem Transport vor der Inbetriebnahme die folgenden Kontrollen nach 5.2 auszuführen: a.1 Dichtigkeit, a.2 Abschluss am Wandlerkopf, b.3 Schraubenkontrollen, b.4 Oberflächenreinigung der Isolatoren, b.5 Hilfseinrichtungen. Ferner empfiehlt sich eine Kontrolle der Wicklungen auf Durchgang.

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Auswertung der VSE-Wandlerstatistik führt zum Schluss, dass die in der Schweiz eingesetzten Messwandler im grossen ganzen betriebstüchtige Apparate sind. Es handelt sich dabei vorwiegend um induktive Wandler. Kapazitive Spannungswandler fallen nicht ins Gewicht. Allerdings hat sich der Ölabschluss mit Stickstoffpolster bei einem Kombiwandler-Typ mit Kopfstromwandler aufgrund ungenügender Dichtigkeit als ungeeignet erwiesen. Ohne periodische Drucküberwachung in kürzeren Intervallen oder eine Änderung des Ölabschlußsystems sollten solche Wandler wegen Explosionsgefahr ausser Betrieb genommen werden. Es wird empfohlen, die Konzeption anderer Wandlertypen mit gleichartigem Ölabschlußsystem zusammen mit dem Hersteller genauestens zu überprüfen und bei Unsicherheiten wenigstens stichproben-

artig Nachmessungen über den Zustand der Isolation vorzunehmen, wozu mindestens TE-Messungen notwendig sind.

Die sich häufenden Porzellanschäden sind alarmierend, auch wenn keine unmittelbare Explosionsgefahr besteht. Eine Voraussage über rissgefährdete Porzellane ist nach dem heutigen Stand nicht möglich. Es bleibt zu hoffen, dass man die Fertigung von Qualitätsporzellan zukünftig besser im Griff hat und die Befestigung des Porzellans am Wandler konstruktiv zweckmässiger, d.h. materialgerecht löst.

Die Beanspruchung der Messwandler im Betrieb kann heute als bekannt vorausgesetzt werden. Unsicherheiten bezüglich der Betriebssicherheit von Messwandlern entstehen dadurch, dass der im Betrieb gegebene Temperaturbereich bei den Prüfungen im Werk gar nicht oder nur unvollkommen berücksichtigt wird. Die bisher mit Wandlern gemachten guten Erfahrungen sprechen gegen eine Aufblähung des Prüfaufwandes, womit die Wirtschaftlichkeit der Wandler in Frage gestellt würde. Aber die aufgetretenen Schäden machen deutlich, dass man sich in den Normen-Gremien zu dieser Problematik Gedanken machen muss. Zumindest sollten im Rahmen der erwähnten Qualitätssicherung die Unterschiede zwischen Betrieb und Prüfung bei der Auslegung der Wandler mit einbezogen werden.

Auch wenn Messwandler zu den wartungsarmen Anlageteilen gehören, so lässt sich doch auf den vorbeugenden Unterhalt nicht ganz verzichten. Bei den als notwendig erachteten Kontrollen ist zu beachten, dass auch Messwandler nur eine beschränkte Lebensdauer haben und ihre Einsatzdauer durch noch so gute Pflege nicht beliebig verlängert werden kann.

Die Frage: Wie lassen sich Explosionen bei schweren inneren Defekten vermeiden oder in ihrer Wirkung mindern, um Folgeschäden an der Umgebung oder die Gefährdung von Personen weitgehend auszuschliessen?, wird bei der Entwicklung zukünftiger Generationen von Messwandlern eine entscheidende Rolle spielen. Lösungen mit Sollbruchstellen zeichnen sich bereits ab. Schon heute gibt es Wandlertypen, bei denen sich die schwächsten Partien ausserhalb des Porzellankörpers befinden, wo sie von Metall umschlossen sind, und deshalb die Wahrscheinlichkeit für eine Explosion des Porzellankörpers bei inneren Lichtbogenfehlern sehr klein ist. Inwieweit sich Gasschutz-Relais oder Wasserstoffmesser als feste Bestandteile von Messwandlern durchsetzen werden, ist schwer vorauszusagen, da sie erst dann in Funktion treten, wenn der Schaden bereits seinen Anfang genommen hat.

Trotz verschiedener neuartiger Meßsysteme [11...14] wird der induktive Wandler wegen seiner Leistungsfähigkeit und seiner hohen erreichbaren Genauigkeit sowie Zuverlässigkeit vorläufig noch seinen Platz behaupten. Ob und wann die Weiterentwicklung und Erprobung anderer Systeme diesen schliesslich zum Durchbruch verhilft, darüber lassen sich heute noch keine verlässlichen Angaben machen.

Literatur

[1] *R.J. Cakebread, K. Reichert* et *H.G. Schütte:* Etudes des postes en fonction de la simplicité, la fiabilité et la sécurité d'exploitation. Rapport CIGRE No. 23–05, 1974.

[2] Störungsstatistik über Nichtverfügbarkeit, Störungen und Schäden elektrischer Netze. VSE 5.55 d/f–79. Zürich, VSE, 1979.

[3] *P. Kulik* e.a.: Fiabilité dans la conception des postes. Influence de l'emplacement dans le réseau et du raccordement au réseau. Rapport CIGRE N° 23–01, 1980.

[4] *D. Ulrich:* Zuverlässigkeit von Messwandlern aus der Sicht des Ad-hoc-Arbeitskreises «Zuverlässigkeit». Unterlagen zum Kurs vom 30. Oktober 1978. Esslingen, Technische Akademie Esslingen, 1978.

[5] Regeln zur Vereinheitlichung der TE-Messung an Messwandlern. Publikation des SEV, Nr. 3304.1976.

[6] *B. Gänger, W. Siemer* et *H.J. Vorwerk:* Ionisation interne dans les transformateurs (de puissance et de mesure) et mesure des perturbations radiophoniques qui en résultent. Rapport CIGRE No 111, 1962.

[7] *H. Grieder, J.C. Veyre* und *F.J. Wolf:* Messung der TE-Einsatzspannung bei entgasten und N_2-gesättigten Ölen in Funktion des Druckes. Haefely-Bericht ZEB-Nr. 101.

[8] *A.J. Sayle:* Neue Definition der Qualitätssicherung. Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Qualitätsförderung, Bulletin (1980)5, S. 7.

[9] Regeln des SEV. Koordination der Isolation. Teil 1: Begriffe, Definitionen, Grundlagen und Richtlinien. Publikation des SEV Nr. 3327–1.1979.

[10] *H. Hartmann:* Betriebserfahrungen mit Isolierölen in magnetischen Messwandlern mit Nennspannungen oberhalb 100 kV. Bull. SEV/VSE 67(1976)22, S. 1214...1219.

[11] *M. Aguet, P. Blech* et *M. Ianovici:* Mesure de courant dans les réseaux à haute tension alternative par l'intermédiaire de fibre optiques. Bull. ASE/UCS 71(1980)17, p. 937...940.

[12] *P. Matthiessen* und *U. Weigel:* Spannungswandler für Hochspannungsanlagen mit kapazitivem Teiler und elektronischem Messverstärker. Bull. SEV/VSE 71(1980)9, 450...455.

[13] *H. Bommer:* Elektronische Hochspannungswandler. Elektrizitätswirtsch. 78(1979)4, S. 103...104.

[14] *L. Mouton, A. Stalewski* et *P. Bullo:* Transformateurs de courant et de tension non classiques. Electra (1978)59, p. 91...122.

Adresse des Autors

H.-J. Vorwerk, Bernische Kraftwerke AG, Viktoriaplatz 2, 3000 Bern 25.