

Die Betriebszuverlässigkeit 61-/papierisolierter Hochspannungswandler mit Luftabschluss - Ergebnisse betriebsüberwachender dielektrischer Prüfungen.

Dipl.-Ing. Gerhard Lange, VEW EUROtest GmbH, Dortmund

Einleitung

Durchgeführte Untersuchungen

Verlustfaktor / TE-Verhalten / Stossspannungsfestigkeit

Ergebnisse

Verlustfaktoranfangswerte, TE-Stärke, TE-Einsatz- und -Aussatzspannung, TE-Diagnose in der Schaltanlage, Stossspannungsfestigkeit

Schlussfolgerungen

Zusammenfassung der Ergebnisse, Konsequenzen für Hersteller und Betreiber

1. Einleitung

Die Betriebszuverlässigkeit der Hochspannungswandler ist von wesentlichem Einfluss auf eine sichere Betriebsführung der Versorgungsnetze. Ausfälle von Wandlern - aus welchen Gründen auch immer - bedeuten deshalb immer empfindliche Störungen des Netzbetriebes. Nun zählen die Hochspannungswandler zu den ausgesprochen sicheren Betriebsmitteln. Für das Jahr 1990 weist die VDEW-Störungs- und Schadensstatistik (1) eine Ausfallquote von 0,24 Promille für die Hochspannungswandler der Spannungsebenen 110 kV, 220 kV und 380 kV auf.

In Zahlen ausgedrückt:

Bei einer Gesamtzahl von 62.627 in den o.g. Spannungsebenen installierten Hochspannungswandlern fielen im Jahre 1990 15 Wandler aus. Diese Grössenordnung entspricht auch der durch die CIGRE (2) über einen längeren Zeitraum ermittelten Ausfallquote von < 0,5 Promille; sie wird zudem durch die Untersuchungen anderer Betreibergesellschaften bestätigt (3, 4).

Die Ausfallquote von Hochspannungswandlern der drei Spannungsebenen im Versorgungsnetz der VEW AG beläuft sich auf 0,6 Promille, ausgewertet über den gleichen Zeitraum wie seinerzeit vom VDE AK "Zuverlässigkeit von Wandlern" (5) .

In dieser VEW-Statistik sind ausschliesslich die Wandler enthalten, die primär als Ursache von Netzstörungen in Frage kamen oder die dem Betriebspersonal durch besondere Merkmale auffielen und aus diesem Grunde vor dem Ausfall rechtzeitig aus dem Netz genommen werden konnten. Im VEW-Netz fielen im Betrachtungszeitraum 7 Wandler durch Gewitterüberspannungen, ein Wandler durch Ferroresonanz, ein Wandler durch einen Windungsschluss und sechs Wandler aufgrund anderer Fehler aus.

Auch wenn es sich um seltene, aber kostenintensive Netzstörungen bei den Ausfällen von Hochspannungswandlern handelt, interessieren wir uns als Betreiber natürlich für die Ursachen des Versagens der Geräte, vor allen Dingen dann, wenn atmosphärische Überspannungen oder Kippschwingungen als Ursache ausscheiden. Hier müssen andere Gründe - z.B. Alterungsvorgänge als Ursachen für die Ausfälle in Betracht gezogen werden. Um sich über das Langzeitverhalten der im Hochspannungsnetz der VEW AG installierten Hochspannungswandler mit Nennspannungen ≥ 110 kV einen Überblick zu verschaffen, mögliche Schwächen, die zu Ausfällen führen könnten, frühzeitig zu erkennen, begannen die Vereinigten Elektrizitätswerke Westfalen AG vor etwa 20 Jahren in ihrem 1969 in Betrieb genommenen Hochspannungsprüffeld - heute gehört dieses Hochspannungsprüffeld zur VEW EUROtest GmbH, einer 100% igen VEW-Tochter - die Untersuchungen der dielektrischen Eigenschaften von Hochspannungswandlern mit einem Öl-/Papierdielektrikum auch auf die Wandler mit Luftabschluss auszudehnen.

Über die Ergebnisse dieser Untersuchungen soll in dem Vortrag berichtet werden.

2. Durchgeführte Untersuchungen

2.1 Allgemeines

In der Regel wurden im Hochspannungsprüffeld nur die Wandler untersucht, die seitens des Stationsbaus "bewegt" und vor ihrem erneuten Einsatz ins Lager zurückgenommen wurden. Anhand der Messergebnisse wurde über die Betriebszuverlässigkeit der Wandler entschieden.

Traten allerdings an einem bestimmten Wandlertyp in kurzen zeitlichen Abständen häufiger Ausfälle auf, wurden die Untersuchungen zur Klärung der Störungsursachen auf ganze Wandlerserien ausgedehnt. Insgesamt wurden in 20 Jahren etwa 670 Hochspannungswandler mit Luftabschluss geprüft, wobei sechs Wandlerfabrikate aus den Herstellungsjahren 1951 bis 1986 beteiligt waren (Bild 1). Bild 1 zeigt auch die Altersstruktur der geprüften Wandler.

Die meisten der geprüften Wandler wiesen ein Alter zwischen fünf und 20 Jahren auf. Die "jüngsten" Wandler waren drei Jahre alt, die ältesten Wandler standen länger als 30 Jahre im Betrieb.

Bezogen auf die Gesamtzahl der im VEW-Netz eingesetzten Hochspannungswandler mit einem Öl-/Papierdielektrikum wurden damit 12 % der Wandler im Prüffeld untersucht.

Bild 2 zeigt die Anzahl der geprüften Wandler, aufgeteilt nach Wandlerart und Spannungsebene. Es überwiegen in den Spannungsebenen 110 kV und 220 kV die Stromwandler; das Verhältnis Strom- zu Spannungswandler beträgt etwa 60 % zu 40 %. Bei den 380-kV-Wandlern wurden von jeder Wandlerart jeweils ein Wandler geprüft. 83 % der Geräte waren 110-kV-Wandler, knapp 17 % 220-kV-Wandler.

80 % der Hochspannungswandler besaßen einen Faltenbalg als Luftabschluss, einen Stickstoffabschluss wiesen 9 % der geprüften Wandler auf, 11 % waren mit Metallmembranen oder -blechen abgeschlossen, den ersten Versuchen eines Herstellers, einen Luftabschluss auf Wandlerkonstruktionen zu setzen, die sich vom Prinzip her als offene Wandler bewährt hatten (Bild 3).

2.2 Dielektrische Prüfungen

An den Hochspannungswandlern wurden die nachstehend aufgeführten dielektrischen Prüfungen vorgenommen :

- Messung des Verlustfaktors $\tan \delta$ bei 50-Hz-Wechselspannung im Spannungsbereich 20 kV bis U_m ,
- Messung der Teilentladungsstärke - in den ersten Jahren der Störspannung - bei 50-Hz-/125-Hz-Wechselspannung im Spannungsbereich 20 kV bis zu einem Spannungswert von 80% der Prüfwechselspannung gemäss VDE 0414, Bestimmung der TE-Einsatz- und der TE-Aussatzspannung, Teilentladungsdiagnose mittels Ultraschall- und/oder E-Feldsonde an in Betrieb stehenden Hochspannungswandlern,
- Prüfung mit Nenn-Steh-Blitzstossspannung an einigen 170-kV-Strom- und Spannungswandlern.

Zu der Auflistung ist anzumerken, dass in den 20 Jahren sowohl die technische Entwicklung der Prüf- und Messtechnik als auch die Erfahrungen mit dieser Technik und die Betriebserfahrungen mit den Hochspannungswandlern Einfluss auf die Prüfverfahren und die Beurteilung der Ergebnisse hatten. Dies gilt vorzugsweise für die TE-Messungen, aber auch für die zusätzlichen Prüfungen mit Blitzstossspannung.

Da bereits beim Bau der Hochspannungshalle grosser Wert auf eine funktionierende Abschirmung gelegt wurde - die Halle ist mit Cu-Folie ausgekleidet, die wichtigsten in die Halle führenden Versorgungsleitungen wurden über HF-Filter geführt - sind sehr gute Voraussetzungen für die Durchführung der Teilentladungsmessungen gegeben. So beträgt der Grundstörpegel bei eingeschaltetem Prüftransformator im Frequenzbereich 40 kHz bis 220 kHz $< 1 \text{ pC}$.

Bild 4 zeigt den Prüfaufbau für die Hochspannungsprüfungen an einem 110-kV-Wandler.

3. Ergebnisse

3.1 Verlustfaktormessungen

Wie bei vielen Dielektrika ist auch bei der Öl-/Papierisolation von Hochspannungswandlern der Verlustfaktor eine geeignete Kenngrösse zur Beurteilung der Güte einer Fertigung und zur Beurteilung des Alterungszustandes der Isolation. Dies gilt sowohl für die Isolation von Strom- als auch für die von Spannungswandlern, ausgenommenen Spannungswandlern in Kaskadenbauweise, bei denen konstruktive Gegebenheiten die Verlustfaktormessungen beeinflussen.

Dabei ist der sog. Verlustfaktoranzangswert, gemessen bei einem niedrigen Spannungswert, sowie der Verlauf des Verlustfaktors in Funktion der Messspannung bis zu einem Spannungswert in der Grössenordnung von Um für die Beurteilung des Wandlerdielektrikums von Bedeutung.

Bild 5 zeigt die statistische Verteilung der Verlustfaktoranzangswerte für alle überprüften Wandler - Kurve A - für den Hersteller mit der günstigsten Verteilung - Kurve B - und für den Hersteller mit der ungünstigsten Verteilung der Verlustfaktorwerte - Kurve C . Gekennzeichnet durch eine Senkrechte ist der Verlustfaktorwert " 10×10^{-3} " , der einen Hinweis auf eine deutliche Alterung des Wandlerdielektrikums darstellt und den wir als Richtwert betrachten, bei dessen Erreichen die Betriebszuverlässigkeit der Wandlerisolation mit Sicherheit eingeschränkt ist. Grundsätzlich betrachten wir eine Verdoppelung des Verlustfaktorwertes gegenüber dem beim Hersteller gemessenen Neuwert als ein Anzeichen für alterungsbedingte Veränderungen des Wandlerdielektrikums.

Betrachtet man die Häufigkeitsverteilung für die Verlustfaktoranzangswerte aller geprüften Wandler, so ist zu erkennen, dass etwa 4 % der Wandler, was einer Stückzahl von 27 entspricht, diesen Richtwert erreichten bzw. überschritten.

Der 50-%-Wert dieser Häufigkeitsverteilung liegt bei einem Verlustfaktoranzangswert von 2×10^{-3} , einem Wert, der dem Neuzustand von Wandlerisolationen entspricht.

Das Diagramm zeigt sehr deutliche Unterschiede im Alterungsverhalten der Wandler verschiedener Hersteller. Während Kurve B eine exzellente Gauss-Verteilung der Verlustfaktorwerte der Wandler eines Herstellers zeigt - 249 Wandler, Baujahre 1959 bis 1980 - die Verlustfaktorwerte liegen zwischen $1,8 \times 10^{-3}$ und $5,8 \times 10^{-3}$, zeigt Kurve C , dass die Wandler dieses Herstellers - 89 Wandler, Baujahre 1955 bis 1968 - ein sehr ungünstiges Alterungsverhalten aufweisen. Fast 12 % der Wandler erreichten oder überschritten den Richtwert, wobei die Verlustfaktorwerte im Neuzustand durchaus normal waren. Die statistischen Verteilungen der $\tan \delta$ - Werte der anderen Hersteller lagen zwischen den Kurven B und C.

Was sind nun die Ursachen für die Alterungsvorgänge im Öl-/Papierdielektrikum von Hochspannungswandlern mit Luftabschluss, die durch eine Veränderung des Verlustfaktors angezeigt werden? Es kommen nach unseren Erfahrungen zwei Faktoren in Frage:

- Entstehung von inneren Teilentladungen,
- Einsatz nicht geeigneter Materialien und Versagen der Qualitätskontrolle.

Über das Problem der Teilentladungen wird unter Punkt 3.2 zu diskutieren sein, so dass hier nur über die Ursachen der Alterung des Dielektrikums durch den Einsatz nicht geeigneter Materialien und dem Versagen der Qualitätskontrolle in zwei Beispielen berichtet werden soll.

Die auffallend starke Alterung der Wandler des Herstellers, dessen statistische Verteilung des Verlustfaktor Anfangswertes in Kurve C/Bild 5 dargestellt ist, hatte eindeutig ihre Ursache in einer ungeeigneten Konstruktion des Luftabschlusses, der, als Metallmembran ausgeführt, aufgrund von Materialermüdungen undicht wurde und das Eindringen von Feuchtigkeit zuließ. Die Folge war ein starker Anstieg des Verlustfaktors; es kam zu Wandlerausfällen aufgrund von Wärmedurchschlägen.

Den Einfluss von Feuchtigkeit zeigten auch die in Abhängigkeit der Prüfspannung aufgenommenen Verlustfaktorwerte. Hier sei an die Veröffentlichungen von Oberdorfer und anderen in der Zeitschrift E und M (6) erinnert, die sich ausschliesslich den Problemen dielektrischer Prüfungen an Wandlern und Transformatoren widmeten.

Das zweite Beispiel soll die Bedeutung des Verlustfaktorwertes für die Qualitätskontrolle bei der Wandlerfertigung unterstreichen. So wurden im Hochspannungsprüffeld sechs 110-kV-Stromwandler eines Herstellers mit fortlaufenden Fabriknummern aus dem Baujahr 1974 geprüft. Die Verlustfaktor Anfangswerte von vier Wandlern lagen bei etwa $2,2 \times 10^{-3}$, die beiden anderen Wandler hatten Verlustfaktor Anfangswerte von 5×10^{-3} bzw. $5,9 \times 10^{-3}$, was als Anzeichen einer Alterung des Dielektrikums gewertet werden musste. Allerdings zeigte auch die Durchsicht der Prüfprotokolle des Herstellers, dass die beiden Wandler schon bei ihrer Herstellung mit diesen Verlustfaktorwerten versehen waren. Ursachen für diese Abweichungen konnten in Diskussionen mit dem Hersteller nicht geklärt werden. Den Verlauf der Verlustfaktorwerte in Abhängigkeit der Spannung zeigt Bild 6 ; beide Wandler hatten geringe Teilentladungen bis 3 pC bei $U_m/\sqrt{3}$. Da die beiden Wandler ohne Klärung der Ursachen für die hohen Verlustfaktorwerte nicht wieder in Betrieb gehen sollten, wurden sie mit Blitzstossspannung beansprucht. Beide Wandler schlugen beim ersten Spannungsschoss mit Nenn-Steh-Blitzstossspannung (550 kV) durch.

Die Demontage beider Wandler erbrachte dann sehr interessante Ergebnisse. Bei beiden Wandlern wurden anstelle der zum Dickenausgleich am Übergang zur Ausleitung üblichen gefiederten Papiere eine Handvoll Papierstückchen eingelegt (Bild 7), was zu den beschriebenen Abweichungen des Verlustfaktors und mit Sicherheit zu einer Beeinflussung der Stossspannungsfestigkeit der Geräte geführt hat.

Die Abweichungen der Verlustfaktorwerte bei Herstellung der Wandler hätte bereits die Aufmerksamkeit der für die Fertigungsqualität Verantwortlichen erregen müssen. Eine Abweichung der $\tan \delta$ -Werte gegenüber den sonst üblichen Werten für einen bestimmten Wandlertyp ist immer ein eindeutiges Merkmal für eine nicht sachgerechte Fertigung.

Aus diesem Grunde ist der Verlustfaktor von Wandlern mit einem Öl-/Papierdielektrikum, gemessen bei niedriger Spannung, eine geeignete Kenngrösse, die Qualität der Fertigung einer Wandlerreihe eines Herstellers zu kontrollieren.

Es ist zu diskutieren, inwieweit die Grösse des Verlustfaktors und seine Abweichung von dem für einen bestimmten Wandlertyp typischen Wert als Qualitätsmerkmal in die Abnahmebedingungen aufzunehmen ist.

3. 2 Teilentladungsmessungen

An insgesamt 560 Hochspannungswandlern wurden Teilentladungsmessungen im Hochspannungsprüffeld durchgeführt, deren Ergebnisse auswertbar waren.

Ausgewertet wurden:

- die Teilentladungsstärke bei den Spannungswerten $U_m / \sqrt{3}$ und U_m bei der Spannungssteigerung und bei der Spannungsabsenkung,
- die Teilentladungseinsatz- und die Teilentladungsaussatzspannung.

Die nachstehende Tabelle 1 fasst die beiden o.g. Spannungswerte bei der Spannungssteigerung gemessenen TE-Werte zusammen (s. auch Bilder 8 u.9).

Tabelle 1 : Teilentladungsstärken, gemessen bei $U_m / \sqrt{3}$ und bei U_m

Bereich der TE-Stärke	Prozentualer Anteil der geprüften Wandler	
	$U_m / \sqrt{3}$	U_m
0 bis 1 pC	87,8 %	65,6 %
1,1 bis 5 pC	8,6 %	20,6 %
5,1 bis 10 pC	0,6 %	4,8 %
10,1 bis 50 pC	0,8 %	6,8 %
50,1 bis 500 pC	0,8 %	0,6 %
> 500 pC	1,4 %	1,6 %

Es ist aus Betreibersicht als erfreuliches Ergebnis zu bewerten, dass 88 % der Wandler bei Leiter-/Erdspeisung und 66 % bei verketteter Spannung TE-Stärken < 1 pC aufweisen. Dies auch unter Berücksichtigung der Tatsache, dass eine Vielzahl der Wandler in der Zeit gefertigt wurden, in der die TE-Messungen in den Kinderschuhen steckten und ihre Bedeutung als Qualitätsmerkmal für die einwandfreie Fertigung eines Wandlers noch nicht erkannt war. Die Prozentzahlen für den Bereich bis zu einer TE-Stärke von 5 pC (etwa 9 % bei $U_m / \sqrt{3}$ bzw. 21 % bei U_m) haben darin ihre Ursache über die Akzeptanz dieser Werte wird zu diskutieren sein.

Der Bereich > 5 pC umfasst bei $U_m / \sqrt{3}$ 3,6 % , bei U_m 13,8 % der geprüften Wandler. Es wurden maximale TE-Stärken bis 4500 pC gemessen, wobei in einzelnen Fällen die Wandler bei der Spannungssteigerung über $U_m / \sqrt{3}$ defekt gingen. TE-Stärken > 5 pC sind grundsätzlich als kritisch zu betrachten. Der Einfluss der TE auf die Betriebszuverlässigkeit eines Wandlers ist natürlich um so stärker, je höher die gemessene TE-Stärke ist. Die Beurteilung der gemessenen Teilentladungsstärken ohne Berücksichtigung der TE-Einsatz- und Aussatzspannungen wäre unvollständig. Die Auswertung dieser Messungen zeigt dann auch interessante Ergebnisse (Bild 10). Das Diagramm lässt erkennen, dass 9 % der TE-behafteten Wandler bereits unterhalb der Leiter-/Erdspeisung ihren TE-Einsatz haben; im Bereich zwischen Leiter-/Erdspeisung und verketteter Spannung setzen bei 22 % der Wandler Teilentladungen ein. Bei 61 % der Wandler setzt die TE oberhalb der verketteten Spannung ein. Das für den Betrieb der Hochspannungswandler unerfreuliche Ergebnis, dass 9 % der Wandler bei Betriebsspannung Teilentladungen aufweisen, wird durch die Verschiebung der Teilentladungs-Aussatzspannungen nach Beanspruchung mit Prüfspannung noch unerfreulicher. So haben noch 52 % der Wandler eine Aussatzspannung im

Bereich oberhalb der verketteten Spannung, nur noch bei etwa 22 % der Wandler setzen die TE im Bereich zwischen verketteter Spannung und Leiter-/Erdspannung wieder aus, unterhalb der Betriebsspannung haben nach der Spannungserhöhung aber immer noch 26 % der Wandler Teilentladungen.

Dieses Ergebnis wird sehr durch das TE-Verhalten der Wandler eines Herstellers beeinflusst, die diese unerfreuliche Charakteristik besitzen. Allerdings waren gerade bei diesen Wandlern Auswirkungen auf den Verlustfaktor nach Betriebszeiten zwischen 10 bis 15 Jahren noch nicht zu erkennen. Möglicherweise spielt hier die Konstruktion der Geräte und deren Empfindlichkeit gegenüber auftretenden Teilentladungen eine Rolle. Da uns als Betreiber weder die konstruktiven Details noch das Langzeitverhalten der eingesetzten Materialien beim Auftreten von TE bekannt sind - es ist zu befürchten, dass dies auch den Herstellern nicht mit Sicherheit bekannt ist - sind Wandler mit einem derartigen TE-Verhalten als kritisch zu betrachten.

Die gemeinsam mit dem Fachbereich "Wandler" der VEW AG durchgeführten visuellen Untersuchungen von Wandlern zeigten bei ihrer Demontage überraschende Ergebnisse, die die in den Entwürfen VDE 0414, Teile 201/202, bei bestimmten Spannungswerten genannten zulässigen Teilentladungspegel in Frage stellen.

Dies soll anhand von Beispielen belegt werden. Während des Betriebes fielen dem Betriebspersonal innerhalb kurzer Zeit zwei 110-kV-Stromwandler durch stark überdehnte Faltenbälge auf. Es handelte sich um typgleiche Wandler eines Herstellers aus dem Baujahr 1974. Die Wandler wiesen TE-Stärken von $240 \text{ pC} / > 1\,500 \text{ pC}$ bei $U_m / \sqrt{3}$ auf, die Verlustfaktor Anfangswerte betrugen $7 \times 10^{-3} / 17 \times 10^{-3}$. Bei beiden Wandlern war ein Durchschlag zwischen zwei Steuerbelägen von insgesamt 14 Belägen die Ursache für die hohen Teilentladungen und den Druckanstiegen.

Beide Wandler wiesen stark faltige Wickel auf. An den Rändern der Steuerbeläge waren auf dem Papier Entladungsspuren zu finden, deren Ursache in einer anderen Spannungsverteilung durch den Teildurchschlag zwischen zwei Belägen vermutet wurde. Ein Grund für die Teildurchschläge zwischen zwei Belägen konnte trotz intensiver Untersuchungen nicht gefunden werden (z.B. eingeschlossene Fremdkörper oder Nichteinhaltung der Isolationsdicken).

Zwei Wandler des gleichen Typs aus dem gleichen Baujahr wurden aufgrund ihrer auffallenden Verlustfaktorwerte gegenüber ihren Nachbarwandlern (wie unter Punkt 3.1 beschrieben) nach einer Beanspruchung mit Stossspannung demontiert. Die beiden Wandler wiesen Teilentladungsstärken bei $U_m / \sqrt{3}$ von $3 \text{ pC} / 2 \text{ pC}$, bei U_m TE-Stärken von $9 \text{ pC} / 6 \text{ pC}$ auf. Auffällig war bei beiden Wandlern neben der starken Faltigkeit des Wickels das Vorhandensein von Entladungsspuren an den Enden der Steuerbeläge, wobei die Entladungsspuren an den scharfen Kanten der Falten in der Metallfolie stärker ausgebildet sind. Auf Bild 1 1 sind die Photos dieser Entladungsspuren an den Rändern der Steuerbeläge abgebildet.

Diese visuellen Untersuchungen erbrachten zwei wesentliche Ergebnisse:

- es können Spuren von Teilentladungen, die sich an den Klemmen des Prüflings in Teilentladungsstärken von 2 bis 3 pC bei Betriebsspannung darstellten und die etwa 15 Jahre lang auf die Isolation einwirkten, nachgewiesen werden.
- Die Ursache der Teildurchschläge zwischen den Steuerbelägen der Wandler ist in der starken Faltigkeit des Wickels - vermutlich die Folge eines ungenügenden Füllfaktors- zu suchen. Die überhöhten Feldstärken an den Spitzen der Falten in den Metallfolien führten zu intensiven Teilentladungen, die im Laufe der

Betriebszeit zu einem Durchschlag zwischen zwei Belägen führten mit den beschriebenen Folgen.

Für uns als Betreiber erschreckend ist eigentlich die Tatsache, dass Teilentladungsstärken $< 5 \text{ pC}$ bei Betriebsspannung in den Geräten derartige Folgen haben können. Unsere Forderung nach TE-Freiheit, d.h., TE-Stärken $< 1 \text{ pC}$ bis oberhalb der verketteten Spannung, mit den Herstellern oft hart diskutiert, hat also ihre Berechtigung. TE-Freiheit der Hochspannungswandler bei ihrer Herstellung ist eine Voraussetzung für den ungestörten Betrieb der Wandler über ihre gesamte Lebensdauer. Und da erwarten wir als Betreiber einen ungestörten Betrieb, der deutlich höher liegt als nur 15 Jahre.

Die Empfindlichkeit der Teilentladungsmessung gegenüber Fehlern bei der Fertigung von Hochspannungswandlern soll das nächste Beispiel belegen, wenn auch dieser Fehler eher den Kuriositäten zugerechnet werden muss.

Ein Satz 110-kV-Stromwandler, der erst etwas über drei Jahre in Betrieb stand, wurde routinemässig im Hochspannungsprüffeld überprüft. Dabei wies ein Wandler ein ungewöhnliches TE-Verhalten auf. Bei einer TE-Einsatzspannung deutlich unterhalb der Leiter-/Erdspannung wurde eine TE-Stärke von 14 pC gemessen. Die Teilentladungen setzten bei Wiederholungsmessungen aus und ein. Bei Dauerbeanspruchungen mit verketteter Spannung und mit Leiter-/Erdspannung wurden TE-Stärken bis fast 100 pC gemessen, wobei sich die Werte während der Beanspruchungsdauer veränderten, auch niedriger wurden. Nach Rücksprache mit dem Hersteller wurde der Wandler im Herstellerwerk gemeinsam demontiert. Im Papierwickel wurden Lacksplitters, einige cm^2 gross gefunden (Bild 12). Es stellte sich zudem nach Durchsicht der Fertigungsprotokolle heraus, dass dieser Wandler das festgestellte TE-Verhalten bereits bei den Werksprüfungen zeigte. Bei der der Abnahmeprüfung vorausgehenden Vorprüfung hatte der Wandler erhöhte TE-Werte, bei der Abnahmeprüfung hielt er aber die vorgegebenen Grenzwerte ein. Auch hier hätte die Qualitätskontrolle greifen müssen und den Wandler nicht für die Abnahme freigeben dürfen. Wäre dieser Wandler im Netz geblieben, hätten die Teilentladungen u.U. zum Ausfall des Gerätes geführt. Die Lacksplitters wären nie gefunden worden; als Störungsursache hätten die Überspannungen herhalten müssen. Der Lackrest stammte übrigens von einem Wagen, mit dem die Isolierpapiere transportiert werden.

3.3 Teilentladungsdiagnose an Hochspannungswandlern in der Schaltanlage

Da wir als Betreiber mit einigen Wandlertypen leben müssen, die zu Ausfällen durch Teilentladungen führen können, es aber sehr kostenintensiv ist, ganze Wandlerserien aus dem Netz zu nehmen und durch das Prüffeld zu schleusen, haben wir uns seit einigen Jahren mit der Diagnose von Teilentladungen an in Betrieb befindlichen Geräten beschäftigt. Es stehen uns zwei Verfahren zur Verfügung - beide noch in der damaligen DDR entwickelt - die die Tatsache nutzen, dass TE-Quellen sowohl Signale im Ultraschallbereich als auch im Bereich der elektromagnetischen Wellen abstrahlen. Eingesetzt werden der Ultraschalldetektor des damaligen Instituts für Energieversorgung in Dresden und die sicher bekannte E-Feldsonde von Prof. Lemke. Die Auskopplung der Signale erfolgt durch eine Aufnahme des Körperschalls oder durch die induktive Kopplung beispielsweise an den Erdableitungen der Wandler. Bild 13 zeigt die Ergebnisse einer solchen Diagnose, die an drei Spannungswandlern in einer 110-kV-Schaltanlage durchgeführt wurde.

Mit beiden Methoden wurden an einem Wandler deutlich andere Ergebnisse erzielt als bei

den Nachbarwandlern, was als Hinweis für innere Teilentladungen gewertet wurde. Der Wandlersatz wurde aus dem Netz genommen und im Prüffeld untersucht.

Beim Spannungswert von $U_m/\sqrt{3}$ wiesen zwei Wandler TE-Werte < 1 pC auf, der in der Anlage auffällige Wandler brachte 4500 pC bei einer Einsatzspannung von ca. 40 kV und einer Aussatzspannung von 22 kV als Ergebnis der TE-Messung.

Insgesamt wurden bislang 75 Strom- und Spannungswandler in 110-kV-Schaltanlagen überprüft, wobei noch ein weiterer Spannungswandler des o.g. Typs diagnostiziert werden konnte, ebenfalls mit deutlich erhöhten TE-Werten.

Die an zwei Wandlern aus diesem Satz durchgeführte Gas in Öl - Analyse bestätigte für den einen Wandler das Vorhandensein von Teilentladungen (Tabelle 2, Bild 14).

Der Einsatz der beiden Diagnosemethoden erfährt allerdings einige Einschränkungen, die nachstehend genannt sind:

- Die untere Nachweisgrenze für innere Teilentladungen liegt bei beiden Methoden bei etwa 50 pC.
- Bei Auftreten von Korona in der Anlage ist die E-Feldsonde nicht einsetzbar, da sich diese Signale den Signalen der inneren TE überlagern. Damit ist eine Diagnose an Wandlern in 220-kV- oder 380-kV-Schaltanlagen ohne grösseren Aufwand (Einsatz einer 2.Sonde) praktisch nicht möglich.
- Tritt in den Wandlern das magnetische Kerngeräusch deutlich auf, was bei einigen Wandlern festgestellt wurde, versagt die Ultraschallmethode. Sie versagt auch in den Schaltanlagen der Spannungsebenen > 110 kV wegen der einzuhaltenden Sicherheitsabstände z.B. bei Kopfstromwandlern.
- Es ist erforderlich, sich mit der Konstruktion der Geräte, an denen Teilentladungen im Betrieb diagnostiziert werden sollen, vertraut zu machen, um abschätzen zu können, wo u.U. TE auftreten könnten. Wie bei vielen anderen Diagnosemethoden ist Erfahrung im Umgang mit den hier beschriebenen Methoden eine Voraussetzung für die Beurteilung der Ergebnisse. Diagnose in der Schaltanlage und anschliessende Teilentladungsmessung im Prüffeld sind sicher die günstigsten Schritte, die Betriebszuverlässigkeit der Hochspannungswandler zu beurteilen.

3.4 Stossspannungsprüfungen

Um sich einen Überblick über die Stossanfangsfestigkeit von Hochspannungswandlern zu verschaffen, die längere Zeit in Betrieb standen, wurden an einigen 110-kV-Strom- und Spannungswandlern Prüfungen mit Blitzstossspannung durchgeführt. Die Hochspannungswandler wurden mit jeweils fünf Spannungsstössen mit 80 % der Nenn-Steh-Blitzstossspannung und mit jeweils fünf Spannungsstössen mit Nenn-Steh-Blitzstossspannung bei beiden Polaritäten beansprucht. Anschliessend wurde die Teilentladungsmessung wiederholt, um eventuelle Schäden feststellen zu können. Insgesamt wurden bislang 29 Wandler der Baujahre 1959 bis 1980 mit Stossspannung geprüft, davon waren 11 Wandler Spannungswandler. Insgesamt bestanden sechs Stromwandler - davon fünf Stromwandler eines Herstellers - diese Prüfung nicht. Es erfolgten Durchschläge zwischen 480 kV und 550 kV, bei Erreichen der Nenn-Steh-Blitzstossspannung jeweils beim ersten Spannungsstoss. Ein Spannungswandler wies im Rücken der Stossspannungswelle Entladungen auf, die sich bei der anschliessenden TE-Messung durch eine TE-Stärke von 5 pC bei U_m , bei einer TE-Einsatzspannung von etwa 120 kV und einer TE-Aussatzspannung von 61 kV bemerkbar

machten. Bei Beanspruchung mit der verketteten Spannung stieg die TE-Stärke nach einer Versuchsdauer von sechs Stunden auf 100 pC. Dieser Wandler wurde also durch die Stossspannungsbeanspruchung deutlich geschädigt, was vermuten lässt, dass dieser Wandlertyp im Betrieb gegenüber Beanspruchungen durch Überspannungen empfindlich ist, zumal gerade dieser Wandlertyp durch hohe Teilentladungen im Betrieb auffiel.

Grundsätzlich überraschten die Ergebnisse der Stossspannungsprüfungen, wurde doch nicht erwartet, dass Durchschläge unterhalb oder bei Erreichen der Nenn-Steh-Blitzstossspannung auftreten können, ist doch davon auszugehen, dass die Isolation der Wandler so ausgelegt wird, dass die Nenn-Stehwerte auf jeden Fall gehalten werden.

Da die Stossspannungsfestigkeit der Hochspannungswandler mit einer Öl-/Papier-isolation in erster Linie von der Geometrie der Anordnung bestimmt wird, reine Alterungsvorgänge wie z.B. ein erhöhter Verlustfaktorwert dagegen auf die Stossspannungsfestigkeit keinen merkbaren Einfluss haben sollten, müssen Veränderungen am Aufbau der Wandler nach der Typenprüfung, bei der die Stossspannungspegel nachgewiesen werden müssen, vorgenommen worden sein.

Den Beweis hierfür erbrachte die Demontage der beiden Wandler, bei denen die nicht in der Fertigungsanweisung vorgesehenen Isolierpapierreste vom Personal in die Isolation eingebracht wurden.

Eine Stossspannungsprüfung mit Nenn-Steh-Blitzstossspannung als Stichprobenprüfung - wie sie bereits von einigen Energie-Versorgungs-Unternehmen in der Bundesrepublik gefordert wird - ist für die Abnahmeprüfungen von Hochspannungswandlern zu empfehlen.

4. Schlussfolgerungen

Die über einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren im Hochspannungsprüffeld der VEW zur Beurteilung der Betriebszuverlässigkeit und zur Klärung der Ausfälle von Hochspannungswandlern mit einer Öl-/Papierisolation unter Luftabschluss durchgeführten dielektrischen Prüfungen haben Ergebnisse, die einen guten Überblick über die Zuverlässigkeit der Geräte der verschiedenen Hersteller gestatten.

Die Ergebnisse sind zudem auch auf die bei den anderen Betreibern in den alten Bundesländern eingesetzten Hochspannungswandler übertragbar, die alle von den gleichen Wandlerherstellern (AEG, BBC, Haefely, MWB, Ritz, Siemens) in diesen Jahren beliefert wurden.

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse, dass die öl-/papierisolierten Hochspannungswandler mit Luftabschluss ein sehr sicheres Betriebsmittel der Versorgungsnetze darstellen und Ausfälle nur dann zu beklagen sind - sieht man von den atmosphärischen und den netzbedingten Überspannungen ab - wenn konstruktive Mängel und das Versagen der Qualitätskontrolle zu negativen Beeinflussungen der Wandlerisolation geführt hatten. Die Aufzählung einiger typischer Beispiele - diese Aufzählung konnte nicht vollständig sein - hat dies sicher verdeutlicht.

Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse dieser Untersuchungen wie folgt beschreiben:

- Mit der Verlustfaktormessung und der Messung der Teilentladungen an Hochspannungswandlern mit einem Öl-/Papierdielektrikum unter Luftabschluss stehen zwei Messverfahren zur Verfügung, die es den Herstellern und den Betreibern erlauben, die Qualität einer Wandlerfertigung und das Betriebsverhalten der Wandler im Netz zu beurteilen; hierzu kann auch die Überprüfung der Stossspannungsfestigkeit herangezogen werden.
- Bei fast 90 % der geprüften Hochspannungswandler lässt der Verlustfaktor keine Alterung der Wandlerisolationen erkennen, auch nach Betriebszeiten von mehr als 30 Jahren nicht, sofern keine konstruktiven Mängel vorlagen.
- Erhöhte Verlustfaktorwerte waren eindeutig zurückzuführen auf den Einsatz nicht geeigneter Materialien (Luftabschlüsse, Isoliermaterialien) oder auf das Auftreten von Teilentladungen, deren Ursache meist auch noch in konstruktiven Mängeln zu suchen waren.
- Das Teilentladungsverhalten der geprüften Hochspannungswandler wird sicher beeinflusst durch die Wandler, die den frühen Herstellungsjahren zuzuordnen sind, in denen weder die Erfahrungen mit der Teilentladungs-Messtechnik noch die Erfahrungen mit der Grösse der für die Hochspannungswandler zulässigen Teilentladungsstärke vorhanden waren.

Unter Berücksichtigung dieser Tatsache sind die 88 % der Hochspannungswandler, denen unter normalen Betriebsverhältnissen Teilentladungsfreiheit bescheinigt werden konnte, ein erfreuliches Ergebnis, allerdings negativ beeinflusst durch die Eigenschaften der Wandler eines Herstellers, bei denen sich die Teilentladungsaussatzspannungen nach dem Auftreten von Spannungserhöhungen zu Werten unterhalb der Leiter-/Erdspannung hin verschoben, einer Eigenschaft, die von Betreiberseite nicht akzeptiert werden kann.

Als wesentliches Ergebnis der Teilentladungsmessungen ist festzuhalten, dass bereits Teilentladungsstärken in der Grössenordnung bis 5 pC bei Betriebsspannung, wenn sie als Dauerbeanspruchung auftreten, in den Wandlerisolation nachzuweisen sind und die Betriebszuverlässigkeit der Hochspannungswandler negativ

beeinflussen.

Ursachen für das Auftreten von Teilentladungen sind - und dies zeigten die wenigen Beispiele - entweder konstruktive Mängel oder das Versagen der Qualitätskontrolle. Zu den Ursachen von Teilentladungen sind auch die konstruktiven Mängel einiger Wandlerausführungen zu zählen, die das Auftreten von Teilentladungen nach einer Beanspruchung mit Blitzstossspannung zulassen. Wandler mit derartigen Eigenschaften sind für den Netzbetrieb nicht brauchbar.

- Die Überprüfung der Stossspannungsfestigkeit betriebsgealterter Hochspannungswandler ist geeignet, Schwachstellen einer Wandlerkonstruktion, die bei den Endprüfungen beim Hersteller nicht erkannt oder seitens der Qualitätskontrolle nicht als kritisch bewertet wurden, aufzudecken. Die Ergebnisse der wenigen durchgeführten Stossspannungsprüfungen haben dies gezeigt.

Welche Konsequenzen ergeben sich aus den hier vorgestellten Ergebnissen der an betriebsgealterten Hochspannungswandlern durchgeführten dielektrischen Prüfungen für Hersteller und Betreiber gleichermaßen ?

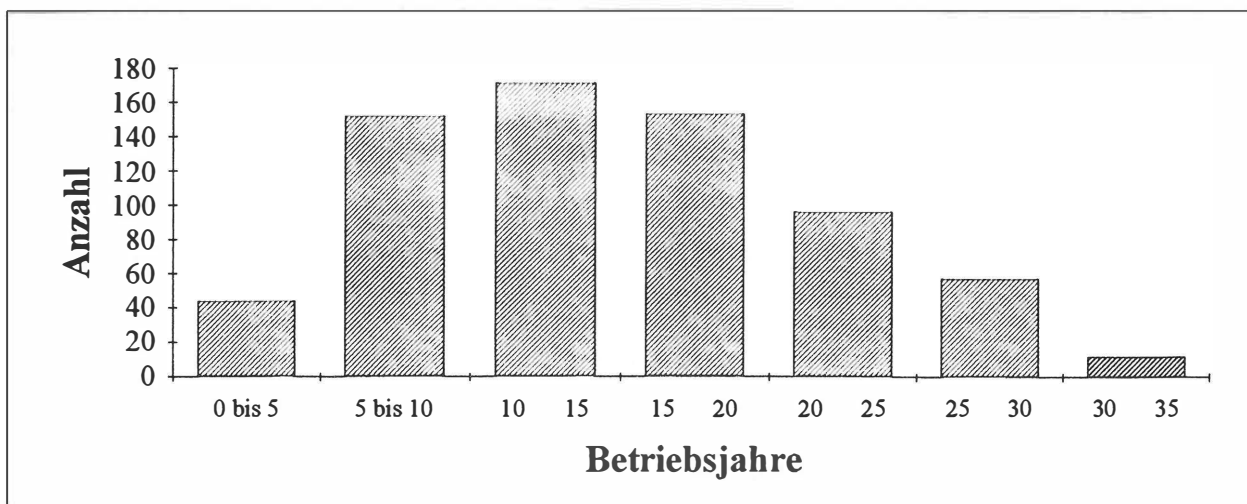
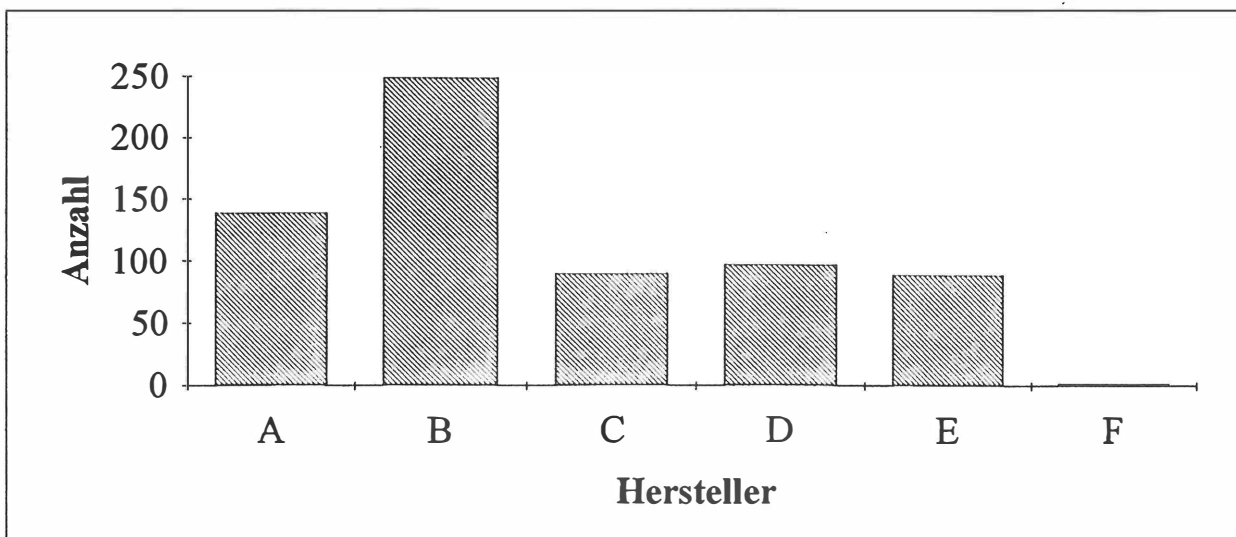
Für den sicheren Betrieb von Hochspannungswandlern über deren gesamte Lebensdauer ist eine exakte Qualitätskontrolle über sämtliche Fertigungsstufen von ausschlaggebender Bedeutung. Ein lückenloser Nachweis dieser Qualitätskontrolle ist erforderlich.

Die Bedingungen für die Abnahme- oder Endprüfung der Geräte - dem letzten Schritt der Qualitätskontrolle - sind durch nachstehende Bedingungen zu erweitern:

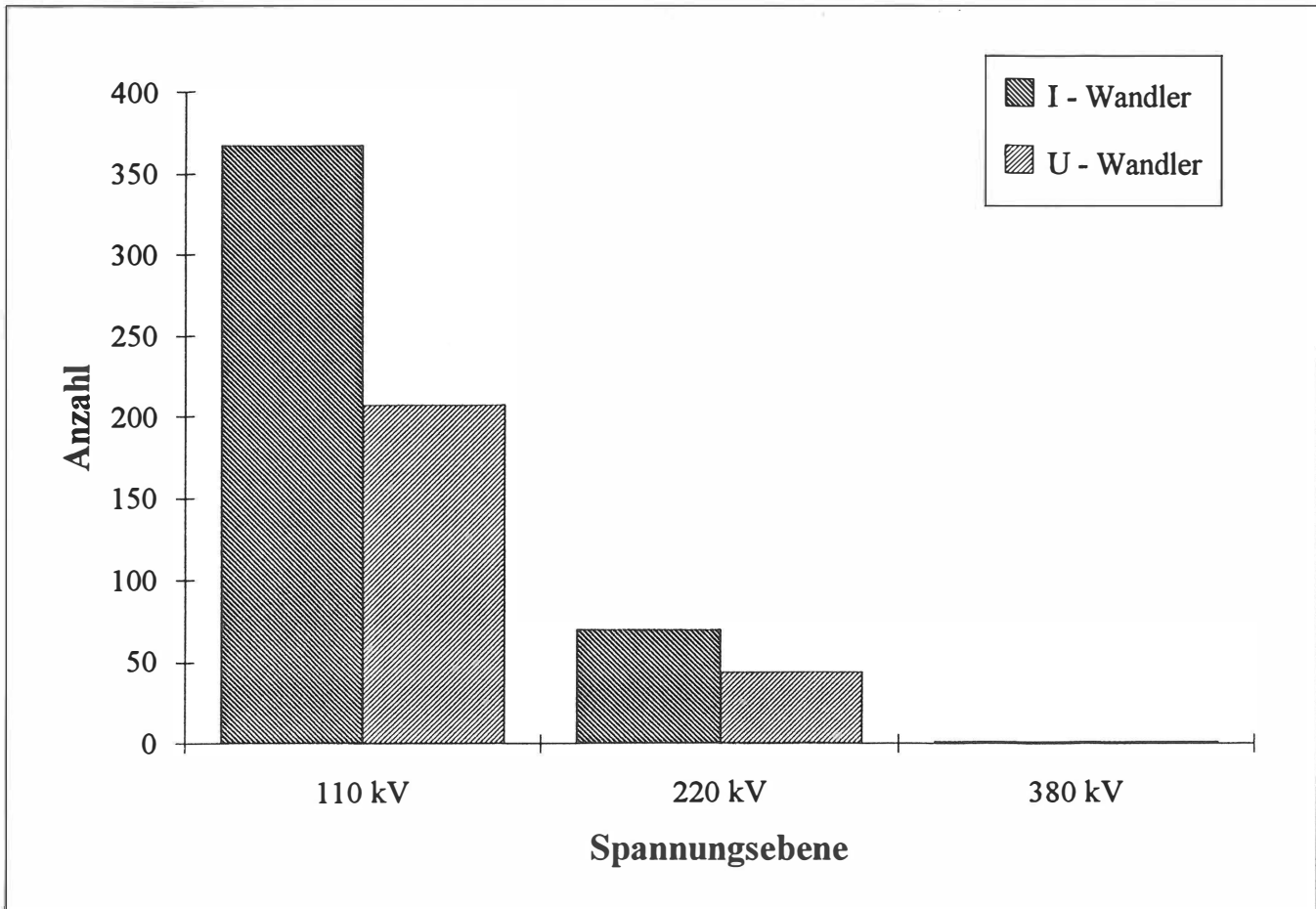
- Festlegung eines Verlustfaktoranzangswertes für einen bestimmten Wandlertyp, beispielsweise $\tan \delta_0 = 2,5 \times 10^{-3}$ / Abweichung + 10 %.
- Es ist Teilentladungsfreiheit ($< 1 \text{ pC}$) bis zu Spannungswerten oberhalb U_m zu fordern, um Ausfälle von Wandlern während des Betriebes zu vermeiden. Wenn ein Herstellerprüffeld den Qualitätsansprüchen der ISO 9000 entsprechen will, sollten die Grundstörpegel der Prüffelder im Bereich $< 1 \text{ pC}$ liegen. Es ist zudem Stand der Technik, dass die uns bekannten Hersteller teilentladungsfreie Hochspannungswandler fertigen können und auch fertigen.
- Eine Erweiterung der Abnahmeprüfung durch die Prüfung der Geräte mit der Nenn-Steh-Blitzstossspannung und anschliessender Teilentladungsmessung als Stichprobenprüfung ist zu empfehlen.
- Bei Auftreten von Wandlerausfällen oder von Unregelmässigkeiten im Betrieb der Wandler - auch nach längeren Betriebszeiten - ist die Rückkopplung zum Hersteller unerlässlich, um aufgetretene Fehler gemeinsam analysieren zu können. Ohne die Betriebserfahrungen der Betreiber von Hochspannungswandlern und die Betreiber sind nun Mal die Langzeitprüffelder der Hersteller - sind Qualitätsverbesserungen und damit Massnahmen, die den Betrieb der Versorgungsnetze sicherer machen, nicht möglich.

5. Literatur

- /1/ VDEW - Störungs- und Schadensstatistik 1990, VDEW-e.V.
- /2/ CIGRE 23 / WG 07, 1990
- /3/ Vorwerk "Elektrische Messwandler aus der Sicht des Betreibers"
Vortrag anlässlich der Sponsortagung der ETG des SEV, Jan. 92
- /4/ Lipken "Der Betrieb von Hochspannungswandlern"
Vortrag anlässlich des Lehrganges - Messwandler für Mittel- und Hochspannungs-
netze - an der Techn. Akademie Esslingen, Nov.91
- /5/ VDE AK "Zuverlässigkeit von Hochspannungswandlern", 1975
- /6/ Oberdorfer u. andere, E und M, Jahrgang 87, Heft 5



**Bild 1: Anzahl der geprüften
Hochspannungswandler:
Hersteller / Altersstruktur**



**Bild 2: Anzahl der geprüften Hochspannungswandler
Spannungsebene / Wandlerart**

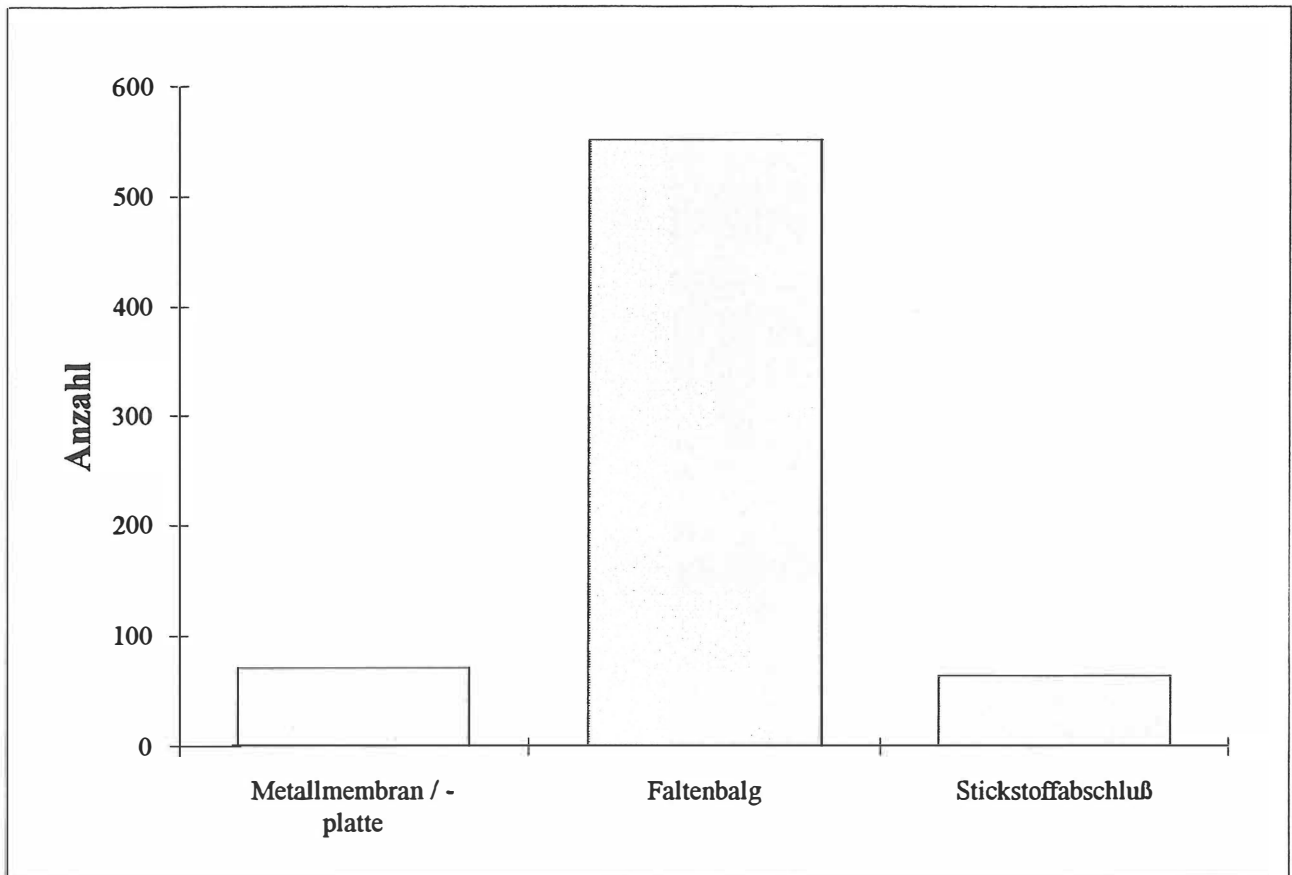
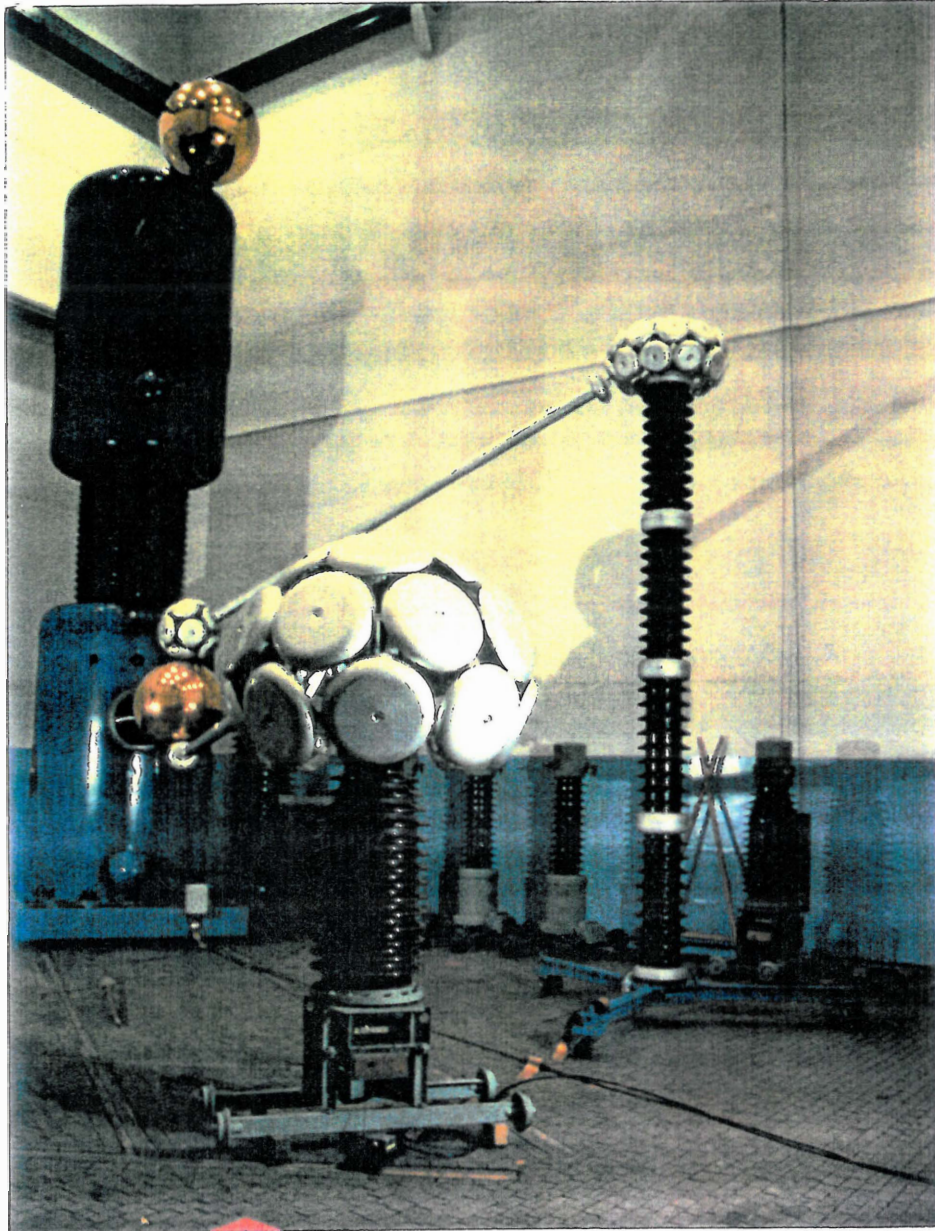
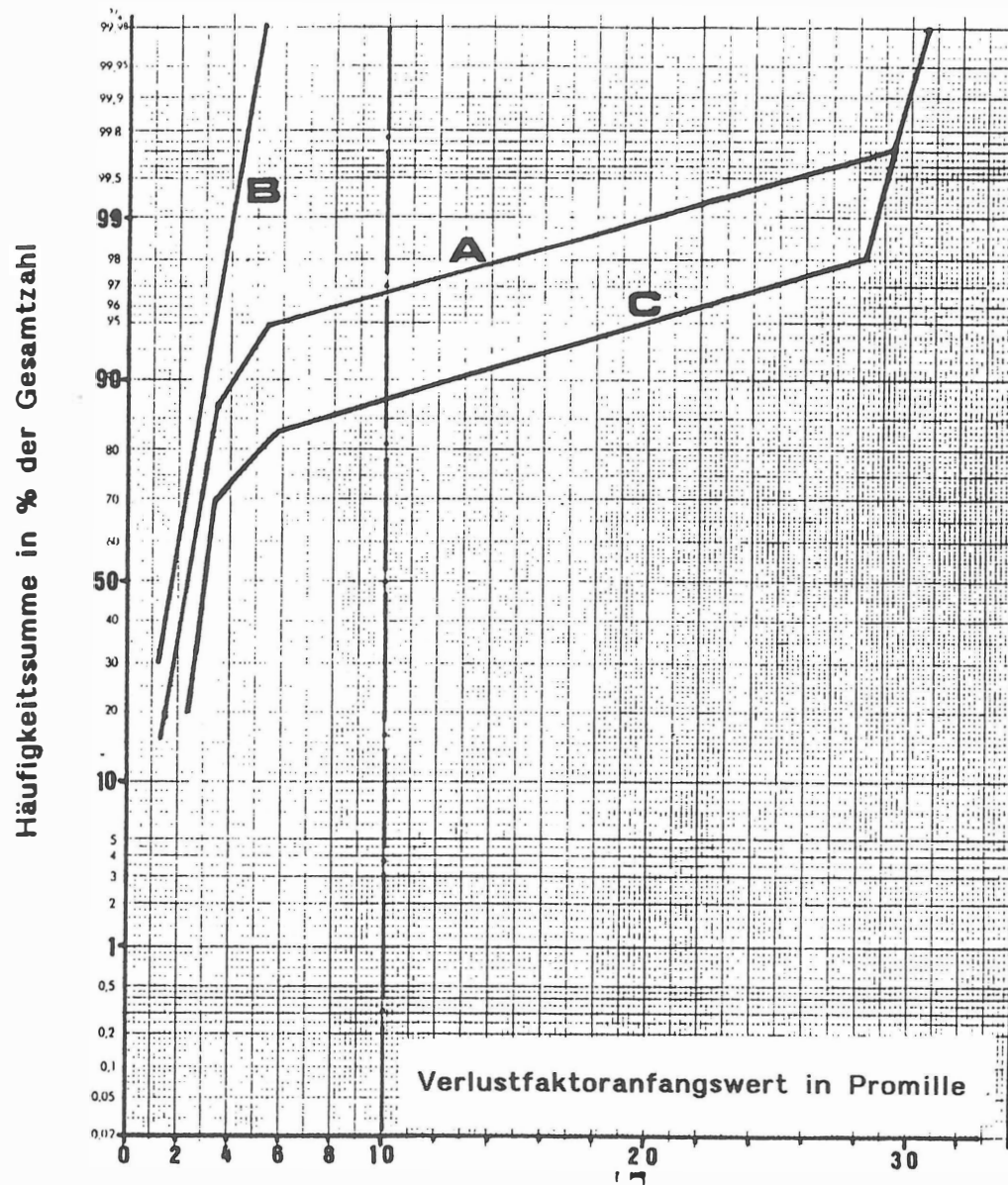


Bild 3: Art der Luftabschlüsse der untersuchten Hochspannungswandler



**Bild 4: Prüfaufbau für die TE-Messung
an einem 110-kV-Wandler im
Hochspannungsprüffeld der
VEW EUROtest GmbH**



**Bild 5: Statistische Verteilung der Verlustfaktor-
anfangswerte, gemessen an Hochspannungs-
wandlern verschiedener Hersteller.**

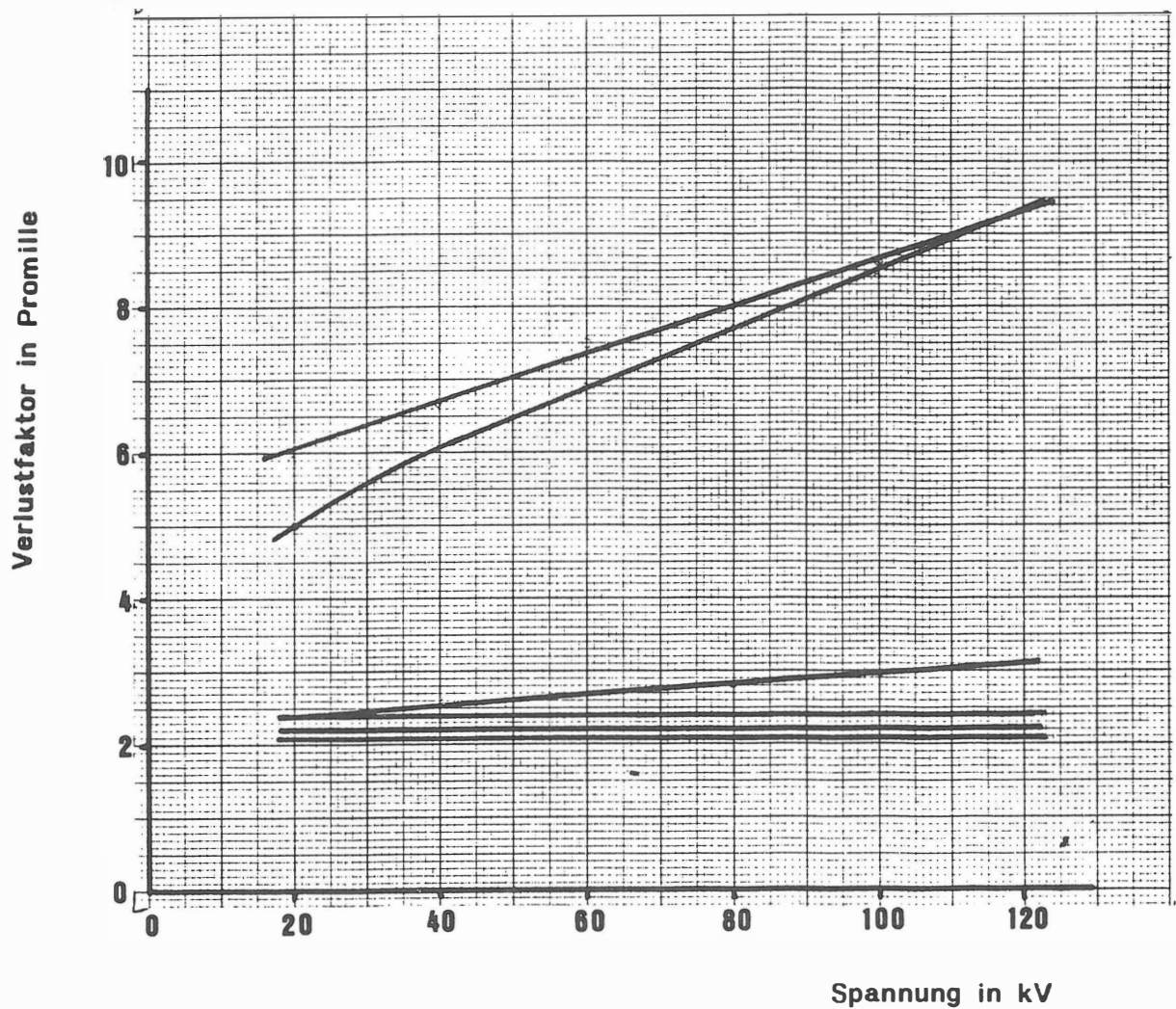
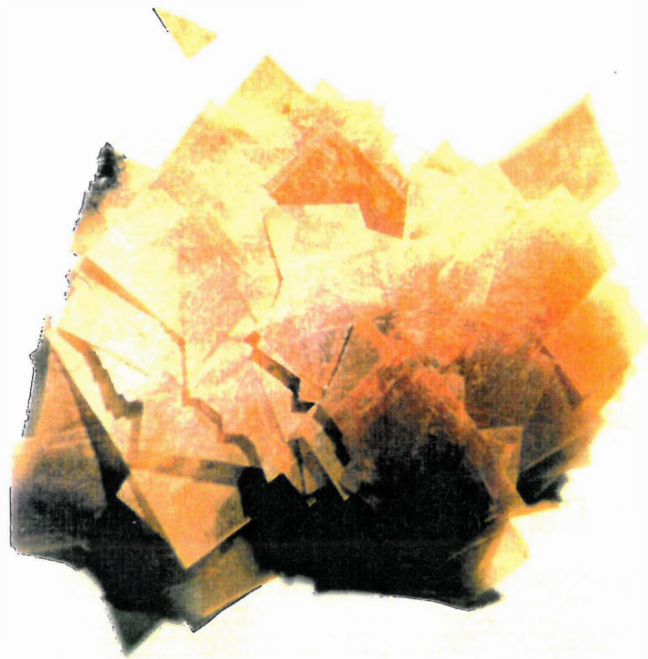


Bild 6 : Verlustfaktor in Funktion der Spannung, gemessen an 110-kV-Stromwandlern eines Herstellers nach 16 Betriebsjahren.



**Bild 7 : Demontage eines 110-kV-Stromwandlers -
Isolierpapierreste mit Durchschlags Spuren,
eingefügt als Dickenausgleich.**

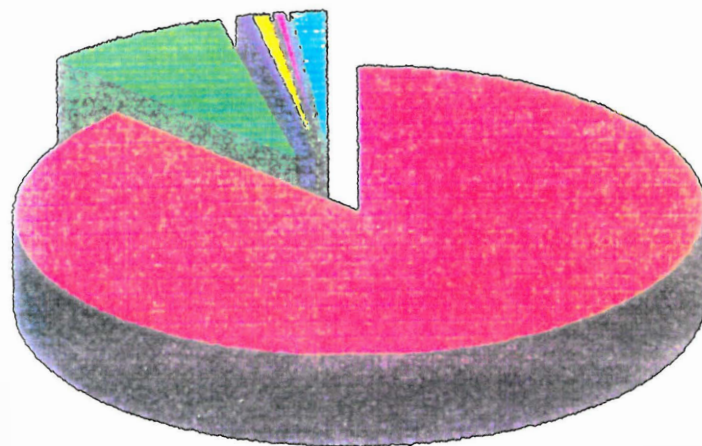


Bild 8 : Teilentladungsstärke, gemessen an Hochspannungswandlern beim Spannungswert $U_m / \sqrt{3}$

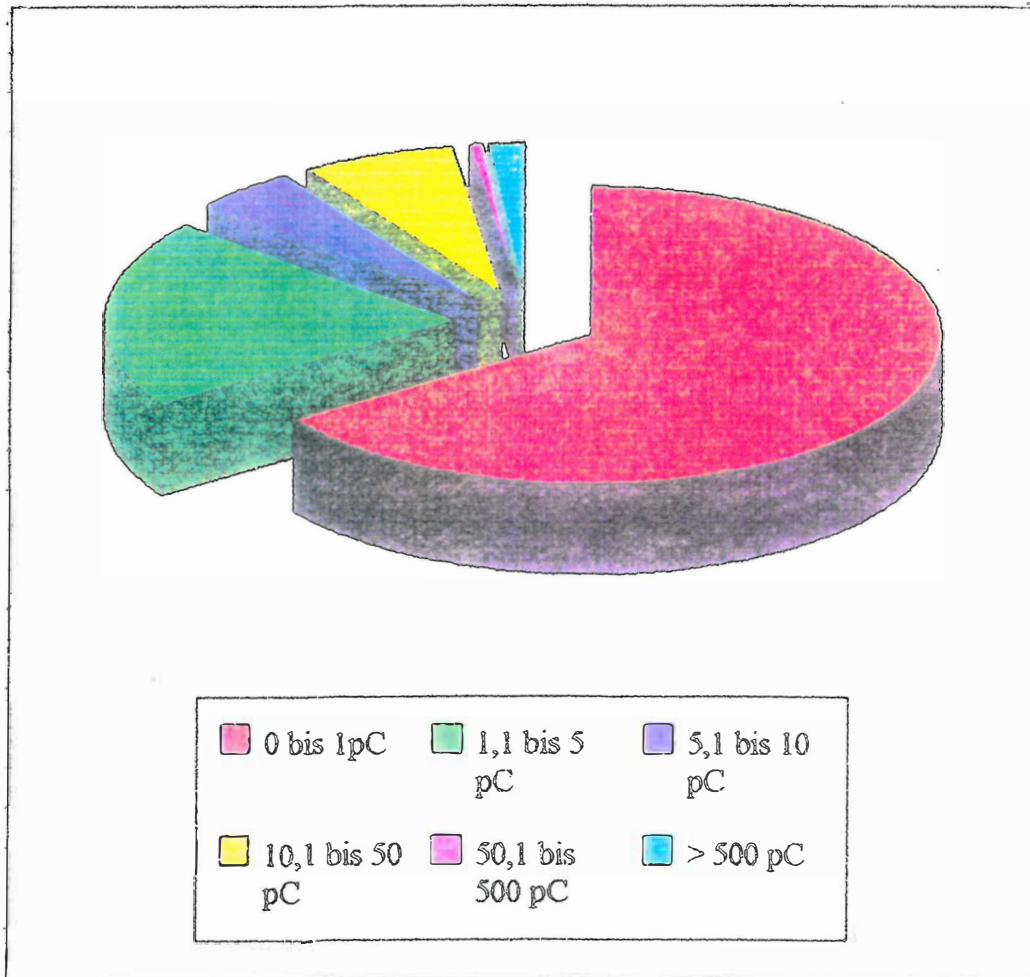
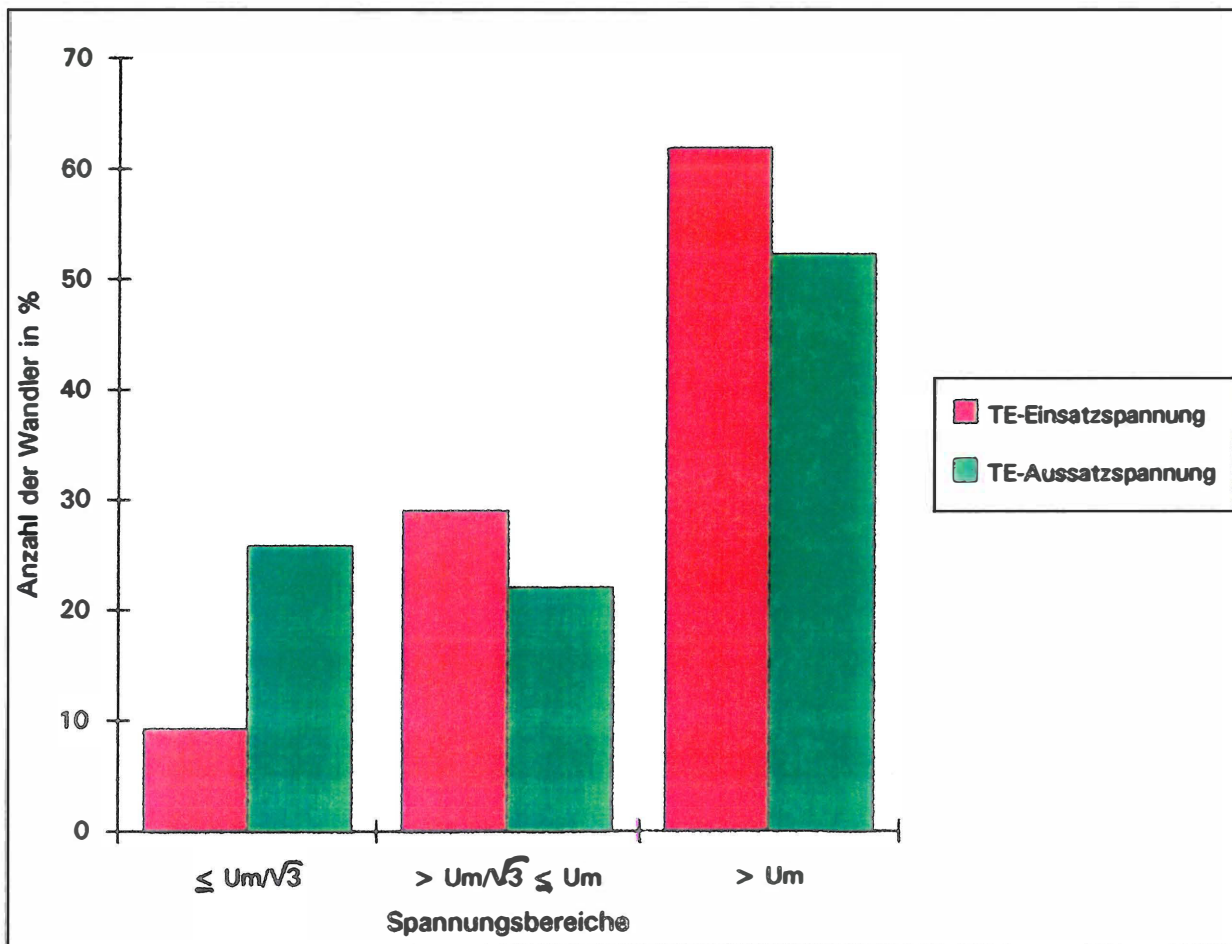
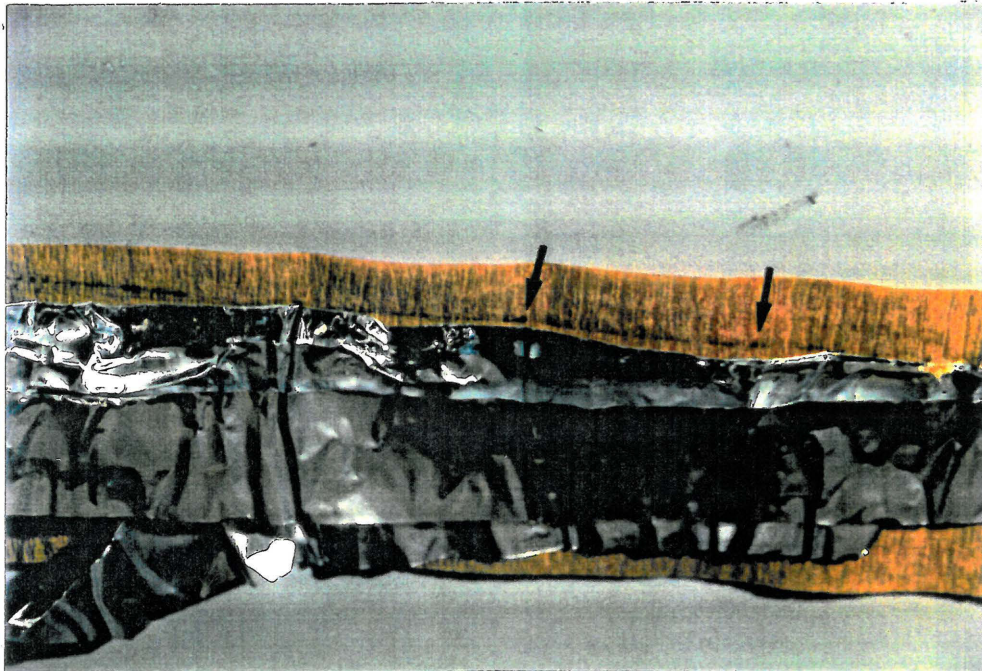
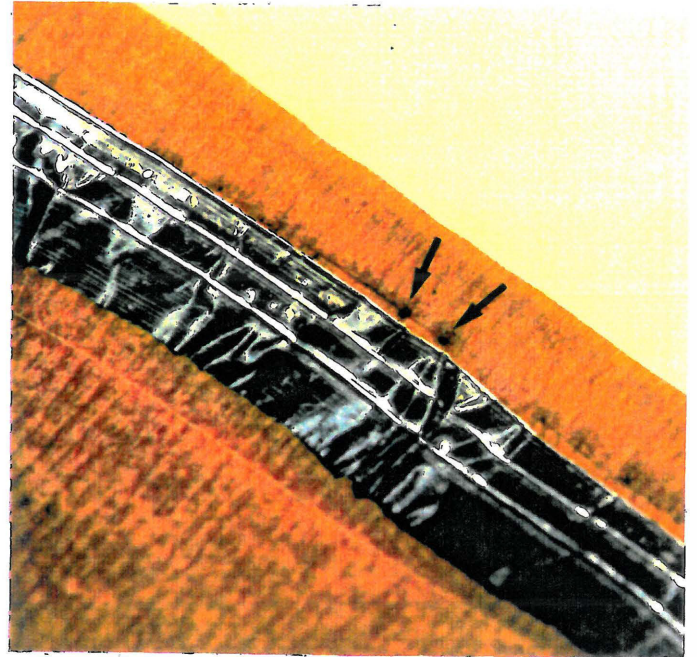
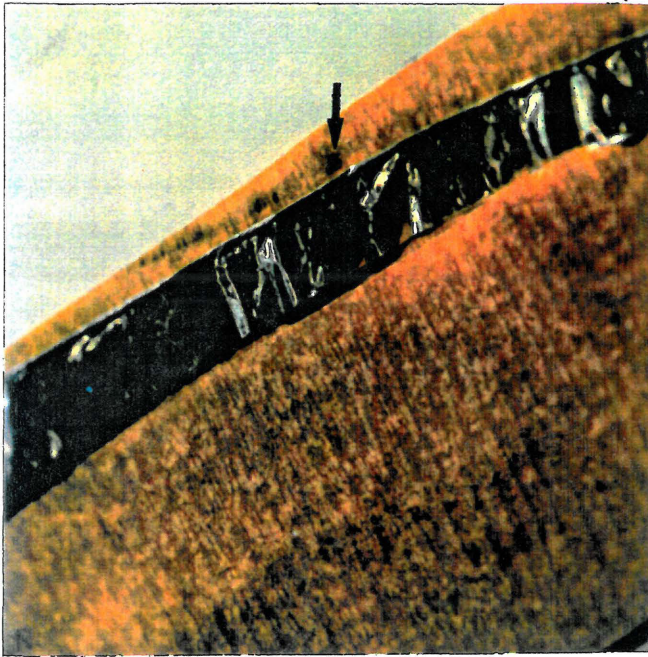


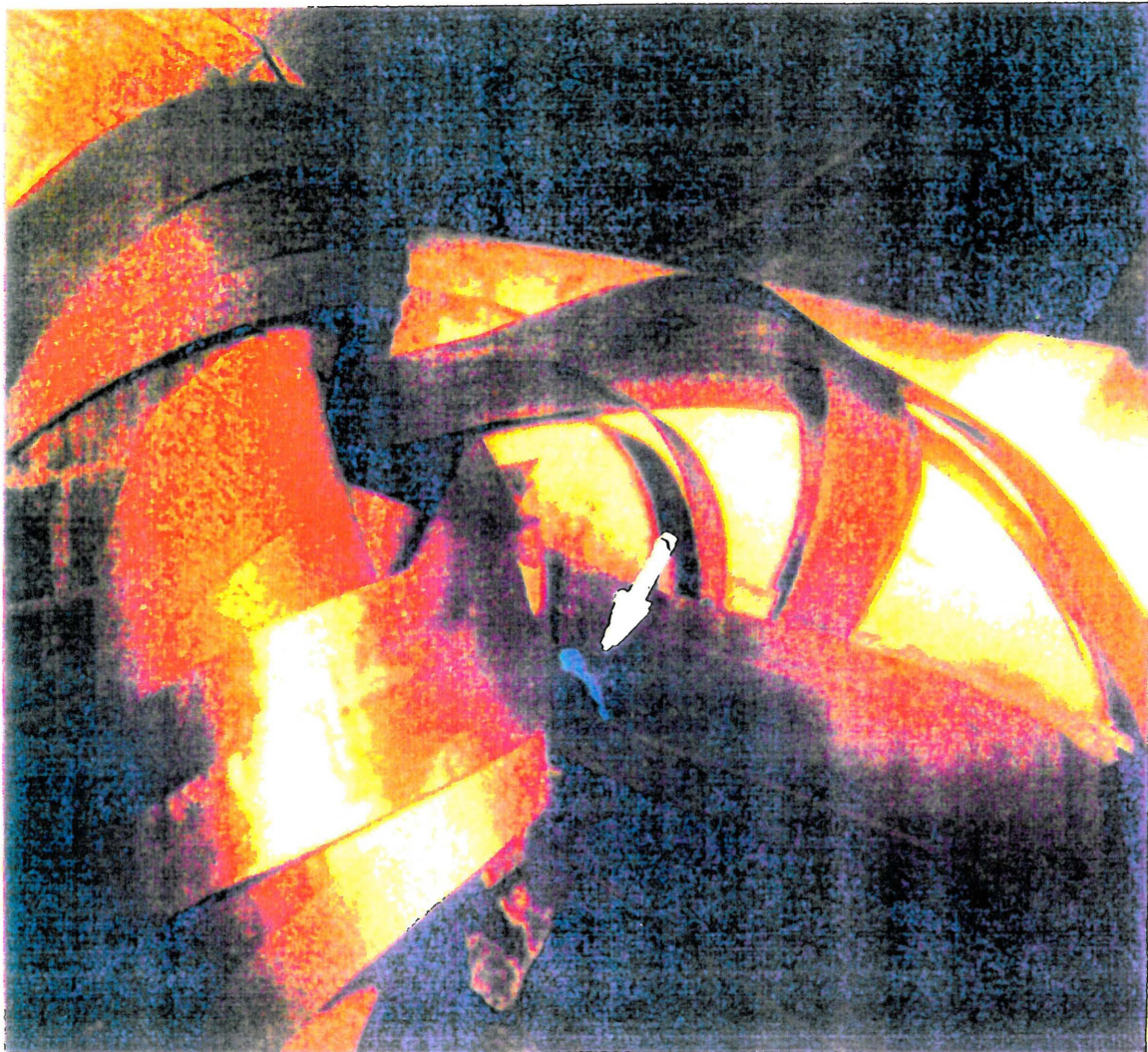
Bild 9 : Teilentladungsstärke, gemessen an Hochspannungswandlern beim Spannungswert U_m



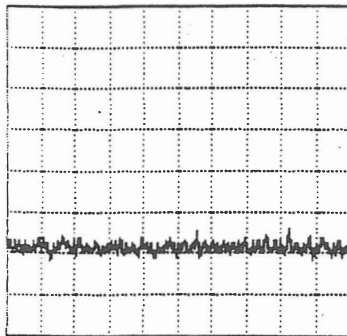
**Bild 10 : Teilentladungs-Einsatz- und -Aussatz-Spannung,
gemessen an Hochspannungswandlern**



**Bild 11 : Entladungsspuren an Steuerbelägen von
110-kV-Stromwandlern**

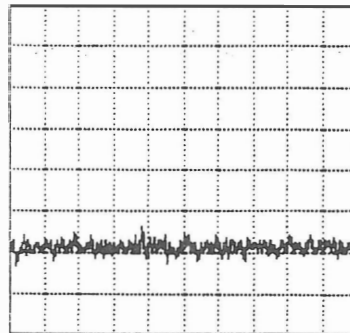


**Bild 12 : Lacksplitter in der Papierisolation eines
110-kV-Stromwandlers.**



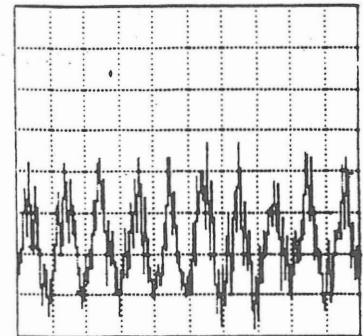
Channel 1 5 U/Div
Timebase 10 mS/Div

Phase L1



Channel 1 5 U/Div
Timebase 10 mS/Div

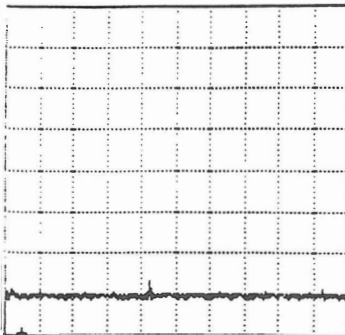
Phase L2



Channel 1 5 U/Div
Timebase 10 mS/Div

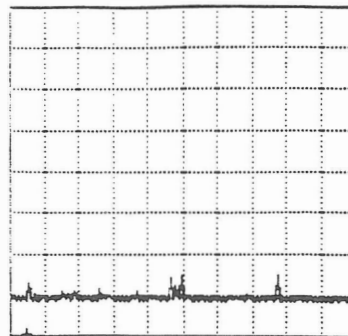
Phase L3

Oszillogramme der Diagnose mit der Ultraschallsonde



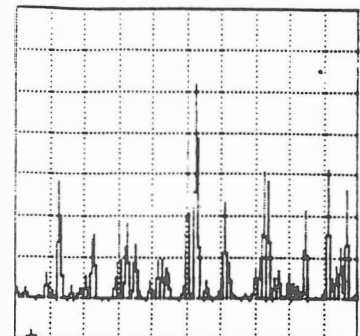
Channel 1 20 U/Div
Timebase 10 mS/Div

Phase L1



Channel 1 20 U/Div
Timebase 10 mS/Div

Phase L2



Channel 1 20 U/Div
Timebase 10 mS/Div

Phase L3

Oszillogramme der Diagnose mit der E-Feldsonde

**Bild 13 : Ergebnisse der Teilentladungsdiagnose
mittels Ultraschalldetektor und E-Feldsonde
an 110-kV-Spannungswandlern in der
Schaltanlage.**

Tabelle 2 : Gaskonzentration in Isolierölen von 110-kV-Spannungswandlern

Komponente		Konzentration in ppm	
		Wandler 1	Wandler 2
Stickstoff	N ₂	67.214	93.451
Sauerstoff	O ₂	8.523	4.163
Kohlendioxid	CO ₂	395	222
Kohlenmonoxid	CO	62	56
Wasserstoff	H ₂	6.992	71
Methan	CH ₄	2.444	5
Ethin Acetylen	C ₂ H ₂	4	1
Ethen Äthylen	C ₂ H ₄	4	5
Ethan Äthan	C ₂ H ₆	259	3
Propen Propylen	C ₃ H ₆	9	4
Propan	C ₃ H ₈	124	2

Bild 14 : Ergebnisse der Gas-in-Öl-Analyse von Isolierölen typgleicher 110-kV-Spannungswandler eines Herstellers