

Isolierstoffuntersuchungen an gealterten Maschinentransformatoren und Vergleich der Ergebnisse mit diagnostischen Kenngrößen

Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried, Dipl.-Ing. Christian Homagk, Dipl. Wi.-Ing. Dietmar Giselbrecht,
Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe

Dr.-Ing. Jens Paetzold, Dipl.-Ing. Manfred Stach, E.ON Engineering GmbH, Gelsenkirchen

Klaus Etz Korn, Grosskraftwerk Mannheim AG, Mannheim

Kurzfassung

Im Zuge der Globalisierung ist auch bei Kraftwerken der Kostendruck gestiegen, daher besteht die Anforderung, die Lebensdauer vor allem der teureren Komponenten so gut als möglich auszunutzen. Maschinentransformatoren gehören zu den zentralen Komponenten eines Kraftwerks, da sie die gesamte erzeugte elektrische Energie vom Generator ins elektrische Energienetz übertragen. Inzwischen haben die Maschinentransformatoren in zahlreichen Kraftwerksblöcken ein Alter um die 30 Jahre erreicht und sind damit möglicherweise sehr nahe an ihrem Lebensdauerende angekommen. Vor diesem Hintergrund stellt sich bei einer nennenswerten Anzahl der heute betriebenen Maschinentransformatoren die Frage, in welchem Zustand sich deren Isolationssystem nach ca. 30 Betriebsjahren befindet, wie lange ein sicherer Betrieb noch möglich ist und zu welchem Zeitpunkt eine Ersatzbeschaffung notwendig und sinnvoll ist.

In dem Beitrag werden die Untersuchungsergebnisse von Materialproben aus dem Isolationssystem von betriebsgealterten Maschinentransformatoren vorgestellt, die im Rahmen von Verschrottungen gewonnen wurden. Ferner werden die tatsächlichen Befunde mit den Ergebnissen der Gas-in-Öl-Analyse verglichen.

1 Einleitung

Maschinentransformatoren sind zentrale Komponenten eines Kraftwerkes. Dennoch stehen sie bei Kraftwerkstechnikern nicht im Mittelpunkt des Interesses. Das liegt vor allem an der Zuverlässigkeit dieser Komponenten im Vergleich zu anderen Kraftwerksanlagen und daran, dass Maschinentransformatoren nicht zu den wartungsintensiven Kraftwerkskomponenten gehören. Wichtig sind sie dennoch – muss doch die gesamte erzeugte elektrische Energie den Transformator passieren. Ohne Maschinentransformator keine Energieerzeugung und damit kein Profit für die Kraftwerksbetreiber!

In zahlreichen Kraftwerken befinden sich die Maschinentransformatoren mit einem Alter um 30 Jahre heute jedoch nahe an ihrem Lebensdauerende. Damit stellt sich die Frage, zu welchem Zeitpunkt eine Ersatzbeschaffung erfolgen muss. Um dies zu beantworten, sind verschiedene Erwägungen von Bedeutung. Zu den wichtigsten Aspekten gehört der Zustand eines Maschinentransformators, insbesondere der Zustand seines Isolationssystems.

Das Isolationssystem von Transformatoren unterliegt verschiedenen Alterungsmechanismen. Verluste in Transformatoren führen zu einer thermischen Beanspruchung des Aktivteils, d. h. des Kerns, der Wicklungen und des Isolationssystems. Das Isolationssystem besteht aus Öl und Zellulose. Beide Materialien altern durch die thermische Be-

anspruchung. Die Zellulose besteht aus Glukoseketten, die durch die thermische Beanspruchung aufgespaltet werden. Auf diese Weise verkürzen sich die Molekülketten der Zellulose, was schließlich die mechanische Festigkeit des Materials herabsetzt. Die mittlere Molekülkettenlänge kann durch physikalisch-chemische Verfahren bestimmt werden und wird als *Durchschnittlicher Polymerisationsgrad (DP)* bezeichnet. Generell gilt folgende Regel für den Zusammenhang zwischen mechanischer Festigkeit des Materials und DP-Wert: eine Reduktion der Zugfestigkeit um 50 % korrespondiert mit einer Reduktion des DP-Wertes auf 25 % des Anfangswertes. Diese Aussage wird im nächsten Abschnitt nachgewiesen, sie findet sich aber auch an anderer Stelle, z. B. in [2]. Eine reduzierte mechanische Festigkeit des Isolationssystems macht einen Transformator und sein Wicklungssystem anfälliger für mechanische Deformationen infolge von Kraftwirkungen, die z. B. bei Kurzschlüssen durch die dabei auftretenden hohen Ströme auftreten.

Neben einer Alterung der Feststoffisolation altert auch das Öl. Hier bewirkt vor allem der Sauerstoff eine Oxidation, die ihrerseits zur Bildung von organischen Säuren (Essigsäure, Ameisensäure) führt.

Wasser im Transformator wirkt als Katalysator und beschleunigt die Alterungsvorgänge, insbesondere die Aufspaltung der Zellulose-Molekülketten.

2 Zusammenhang zwischen DP-Wert und mechanischer Festigkeit

Der Publikation [1] können die in **Bild 1** dargestellten Zusammenhänge zwischen Reduktion der Zugfestigkeit von Transformerboard in Abhängigkeit der Alterungsdauer und Reduktion des Polymerisationsgrades von Transformerboard in Abhängigkeit der Alterungsdauer für verschiedene Temperaturen entnommen werden. Die beiden Diagramme können zusammengefasst werden und man erhält eine Beziehung zwischen der Reduktion der Zugfestigkeit und der Reduktion des Polymerisationsgrades. Diese Zusammenfassung wurde hier für eine Temperatur von 135 °C ausgeführt, da bei dieser Temperatur eine Reduktion des DP-Wertes auf ca. 200 erreicht wird.

Ausgehend von einem bestimmten Wert für die Reduktion der Zugfestigkeit, z. B. $\sigma/\sigma_0 = 0,8$, wird die Alterungsdauer bestimmt. Nun wird bei derselben Alterungsdauer der DP-Wert bestimmt, indem die Diagramme hinsichtlich der Alterungsdauer passgenau untereinander angeordnet werden, so dass man durch herunterloten auf den Schnittpunkt zwischen Alterungsdauer und DP/DP_0 schließlich den DP-Wert bestimmen kann. Auf diese Weise können Wertepaare ermittelt werden, die in **Bild 2** graphisch dargestellt sind.

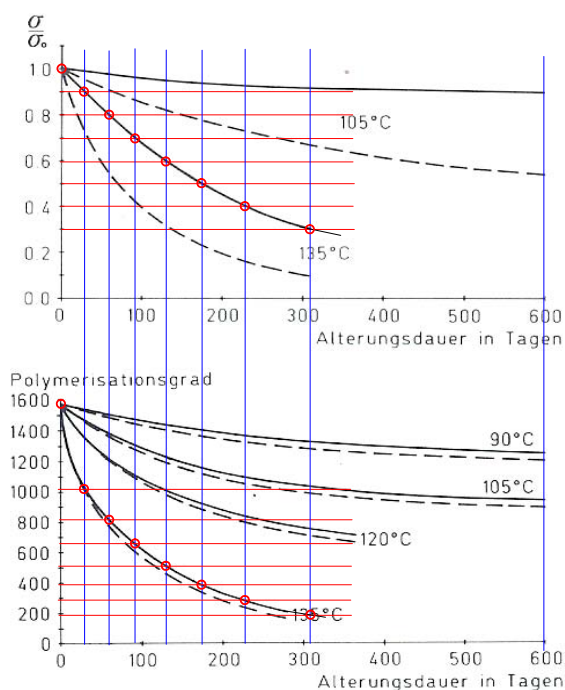


Bild 1 Zusammenhang gemäß [1] zwischen Reduktion der Zugfestigkeit von Transformerboard (σ/σ_0) und Reduktion des Polymerisationsgrades (DP/DP_0) in Abhängigkeit der Alterungsdauer bei verschiedenen Temperaturen

Im Bereich niedriger DP-Werte und niedriger Zugfestigkeiten lässt sich die Beziehung durch die folgenden Gleichungen annähern

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 0,1 + \frac{5}{3} \cdot \left(\frac{DP}{DP_0} \right) \quad DP = DP_0 \cdot \frac{3}{5} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} - 0,1 \right)$$

Geht man von einer Halbierung des Anfangswertes der Zugfestigkeit aus ($\sigma/\sigma_0 = 0,5$), so erhält man

$$DP = DP_0 \cdot \frac{3}{5} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} - 0,1 \right) = DP_0 \cdot \frac{3}{5} \cdot (0,5 - 0,1) = 0,24 \cdot DP_0$$

Ein Anfangswert von $DP_0 = 1000$ würde bedeuten, dass die halbe Zugfestigkeit σ des Anfangswertes σ_0 bei $DP = 240$ erreicht wird. Bei $DP_0 = 800$ wird die halbe Zugfestigkeit σ des Anfangswertes σ_0 bei einem DP-Wert von 192 erreicht. Selbstverständlich sind die Anfangswerte σ_0 bei den anfänglichen DP_0 -Werten von 1000 und 800 nicht identisch.

Man kann also festhalten, dass ausgehend von einem Anfangswert $DP_0 = 800$ eines neu gefertigten Transformators bei einem Polymerisationsgrad $DP = 200$ die Zugfestigkeit von Transformerboard nur noch die Hälfte seines Anfangswertes beträgt. Anders ausgedrückt: ein DP-Wert von 200 bedeutet etwa eine Reduktion der Zugfestigkeit von Transformerboard auf 50% des Anfangswertes.

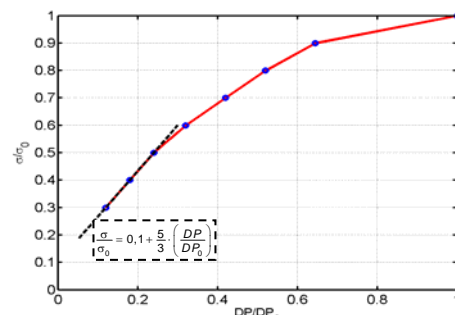


Bild 2 Aus **Bild 1** ermittelter Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit von Transformerboard und Polymerisationsgrad

3 Materialuntersuchungen an gealterten Transformatoren

In einem Forschungsprojekt des IEH Karlsruhe zusammen mit Energieversorgungsunternehmen und Kraftwerksbetreibern wurden im Rahmen der Verschrottung von gealterten Maschinentransformatoren Proben der Leiterisolation und von Transformerboard im Streukanal entnommen.

Generell gestaltet sich die Probeentnahme an den inneren Lagen einer Lagenwicklung schwierig, da man sehr viele Leiter zerschneiden muss, um an die darunter liegende Lage vorzudringen. Dies erfordert ein Aufkeilen der Wicklung, was bei fehlenden radialen Kühlkanälen, insbesondere bei US-Wicklungen aufgrund der großen Leiterquerschnitte, einen unverhältnismäßig hohen Aufwand erfordern würde. Bei Scheibenwicklungen ist das Auf-

keilen der Wicklung und das schrittweise Herausschneiden der Leiter aufgrund der dort vorhandenen radialen Kühlkanäle einfacher. Zu berücksichtigen sind außerdem die durchaus erheblichen Gesamtkosten für die DP-Analyse bei sehr vielen Materialproben. Aus diesen Gründen muss man die Zahl der Materialproben von vorn herein sinnvoll eingrenzen und die Entnahmestellen für Materialproben sorgfältig auswählen.

4 Bewertung der ermittelten DP-Werte

Aus der Statistik [3] können die folgenden Beziehungen zur Berechnung der empirischen Schätzwerte x_m und s für den Erwartungswert des Mittelwertes μ sowie für die Standardabweichung σ herangezogen werden:

$$\mu \approx x_m = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N x_k \quad \sigma \approx s = \sqrt{s_m^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{k=1}^N (x_k - x_m)^2}$$

Der empirische Mittelwert ist der arithmetische Mittelwert x_m der N Einzelmessungen x_k und die empirische Standardabweichung s beschreibt die durchschnittliche (mittlere) Abweichung der Messwerte x_k von ihrem Mittelwert x_m .

Wichtig ist nun die Definition eines mathematisch sinnvollen Verfahrens zur Auswahl der Einzelmessungen x_k , die zur Berechnung der statistischen Größen verwendet werden sollen. Liegen beispielsweise sehr viele DP-Werte vom oberen Wicklungsende vor, so würden die niedrigen DP-Werte am oberen Wicklungsende überproportional stark gewichtet werden und der Mittelwert würde sich zu niedrigen Werten hin verschieben. Deshalb wurden nur jene DP-Werte für die Analyse herangezogen, die in regelmäßigen Abständen in vertikaler Richtung vollständig vorlagen, d. h. im vorliegenden Fall bei 0%, 25%, 50%, 75% und 100% der Wicklungslänge. Grundsätzlich sollten DP-Werte von Proben aus allen Lagen einer Lagenwicklung an diesen äquidistanten Höhen verwendet werden. Dies ist aber wegen der erwähnten Schwierigkeiten bei der Probeentnahme nicht immer möglich. Falls aber die DP-Werte an den auf gleicher Höhe befindlichen Entnahmestellen von verschiedenen Lagen nicht wesentlich voneinander abweichen, so dürfte der Fehler tolerierbar sein, wenn nur Proben der äußeren und der inneren Lage für die statistische Auswertung herangezogen werden.

5 110-MVA-Maschinentransformator

5.1 Visuelle Inspektion

Der 110-MVA-Maschinentransformator, Baujahr 1970, wurde im Jahr 2005 verschrottet. Die visuelle Inspektion des Aktivteils ergab eine starke thermi-

sche Beanspruchung der US-Wicklung. Die mit den papierisolierten Leitern in direktem Kontakt befindlichen Papierlagen zeigten eine starke Schwärzung, wie auch die Leiterisolation selbst. Der Isolierlack der lackisolierten Einzelleiter im oberen Bereich der US-Wicklung haftete nicht mehr am Leiter und platzte bei der Entfernung des Isolierpapiers sehr leicht ab. Außerdem ist die Lackisolierung an vielen Stellen gerissen (**Bild 3**). Das Kupfer selbst zeigt eine gelbliche Färbung, was auf eine starke thermische Beanspruchung hindeutet. Die Papierisolation der Leiter war vor allem in der oberen Wicklungshälfte sehr spröde und zerbröselte bei der geringsten Berührung in kleine Teile. Die tiefe Schwärzung sowie der Geruch des Papiers wiesen auf eine Verbrennung des Materials unter Luftabschluss hin. Der Transformator war offensichtlich thermisch sehr stark belastet und zum Zeitpunkt der Verschrottung längst am Ende seiner Lebensdauer angekommen.

Die Papierisolation der äußeren Lage der OS-Wicklung, d. h. der Stufenwicklung war in vergleichsweise gutem Zustand. Das Papier zeigte eine normale Braun-Färbung und war noch reißfest. Schwärzungen waren vor allem an den oberen Ölaustrittskanälen vorhanden. Dies deutet darauf hin, dass die inneren Lagen der OS-Wicklung thermisch stärker beansprucht waren, als die äußeren. Das Kupfer der OS-Wicklung zeigte eine normale Färbung, war also offensichtlich thermisch weniger belastet als das Kupfer der US-Wicklung. Die Lackisolation der Einzelleiter zeigte keine Risse und bröselte bei Berührung auch nicht vom Leiter ab.



Bild 3 Leiter mit aufgeplatzter Lackisolierung der Kupferleiter der US-Wicklung des 110-MVA-Maschinentransformators

5.2 DP-Analyse

Die Ergebnisse der DP-Analyse der Materialproben sind in **Bild 4** dargestellt. Die US-Wicklung weist bei ca. 75 % der Wicklungslänge mit $DP = 90$ den geringsten DP-Wert aller entnommenen Materialproben auf. Der minimale DP-Wert tritt sowohl bei der US- als auch bei der OS-Wicklung nicht am oberen Wicklungsende bei 100 % der Wicklungslänge, sondern bei ca. 75 % auf. Offensichtlich be-

fand sich der Heißpunkt beider Wicklungen etwas unterhalb des oberen Wicklungsendes. Die DP-Werte des aus mehreren Papierlagen bestehenden Zylinders im Streukanal direkt auf der US-Wicklung sind bereits etwas höher als an der Wicklung selbst. Dies hat sich schon durch die Färbung des Papiers angedeutet. Der bei 50 % der Wicklungslänge bestimmte DP-Wert mit 440 ist vermutlich nicht korrekt, wahrscheinlicher ist ein interpolierter Wert zwischen 300 und 160, also wohl 200 bis 250.

Für die Polymerisationsgrade gelten etwa die folgenden Grenzwerte:

- DP ≈ 1000: Zellulose ist neuwertig
- DP ≤ 200: Zellulose ist durch Alterung unbrauchbar geworden

Die DP-Werte der Lage D der US-Wicklung bei 50 % und 75 % sowie die Papierisolation des Schirmrings über der Lage D liegen unterhalb des Grenzwertes von DP = 200. Dies gilt mit Sicherheit auch für die anderen Lagen der US-Wicklung. Die Leiterisolation der US-Wicklung befand sich damit über weite Teile nicht mehr in betriebsfähigem Zustand.

Die Papierisolation der Leiter der OS-Wicklung befindet sich im oberen Bereich bei 75 % und 100 % nur wenig über diesem Grenzwert bei 200...270. Nach obigen Kriterium befindet sich die Papierisolation der OS-Wicklung zwar noch oberhalb des Grenzwertes von DP = 200, dies jedoch nur geringfügig. Der Höchstwert des DP der vorliegenden Proben betrug 510 und somit nur noch etwa die Hälfte des ursprünglichen Wertes.

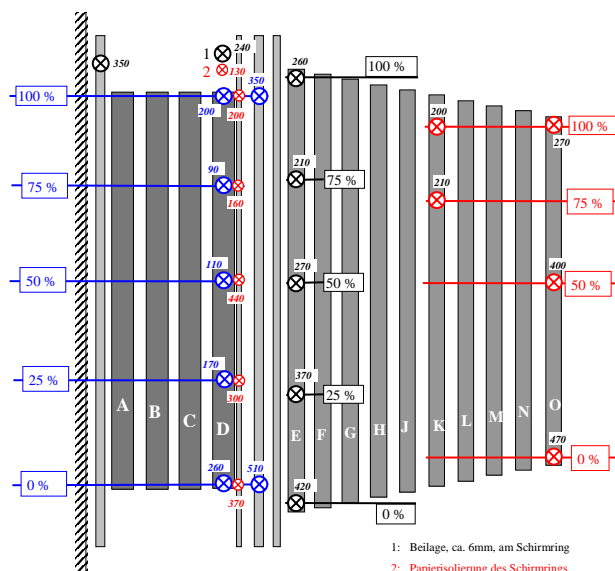


Bild 4 Wicklungsaufbau des 110-MVA-Maschinentransformators und DP-Werte, die an den gekennzeichneten Orten gemessen wurden

Mit dem beschriebenen Verfahren für die Auswahl der relevanten DP-Werte zur Berechnung der Mittelwerte und der Varianz bzw. Standardabweichung erhält man:

$$\overline{DP}_{US} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{Lage D} DP_{US,j} \approx 166 \quad \overline{DP}_{OS} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{Lagen E,O} DP_{OS,j} \approx 334$$

$$s_{US} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sum_{k=1}^5 (DP_{US,k} - \overline{DP}_{US})^2} \approx 69 \quad s_{OS} = \sqrt{\frac{1}{12} \cdot \sum_{k=1}^{13} (DP_{OS,k} - \overline{DP}_{OS})^2} \approx 93$$

Für den mittleren Wert des Polymerisationsgrades der Papierisolation der Wicklungen erhält man:

$$\overline{DP}_{Wicklungen} = \frac{1}{2} \cdot (\overline{DP}_{OS} + \overline{DP}_{US}) = \frac{1}{2} \cdot (166 + 334) = 250$$

Der tiefste festgestellte Wert für den Polymerisationsgrad wurde bei 75% der Wicklungslänge der US-Wicklung an der äußeren Lage, d. h. nächstgelegenen zum Streukanal, festgestellt und beträgt:

$$DP_{\min} = 90$$

5.3 Gas-in-Öl Analyse

In **Bild 5a** sind die Ergebnisse der Gas-in-Öl Analysen der letzten Jahre zusammengestellt.

Gasart	15.6.04	7.4.03	3.6.02	24.7.01
H ₂	17	8	12	0
CH ₄	0	0	1	9
C ₂ H ₆	3	4	10	11
C ₂ H ₄	6	10	43	81
C ₂ H ₂	0	0	0	7
C ₃ H ₈	19	4	0	1
C ₃ H ₆	67	64	99	90
CO	171	126	289	352
CO ₂	7150	3942	6539	5090
O ₂	19690	12380	14060	19600
N ₂	56150	29980	54280	47900

Quotient	15.6.04	7.4.03	3.6.02	24.7.01
H ₂ /CH ₄	-	-	12	0
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₆	0	0	0	0,636
C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	2	2,5	4,3	7,363
C ₂ H ₄ /C ₃ H ₆	0,0896	0,15625	0,434	0,9
CO ₂ /CO	41,81	31,29	22,63	14,46

Schlüssel-Quotient	Grenzwerte	Schlüssel-Gas	Defekt
H ₂ /CH ₄	> 10	Wasserstoff	Teilentladungen
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₆	> 3	C ₂ H ₂	Entladungen
C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	< 1 (T < 300°C) > 1 (T > 300°C)	C ₂ H ₄	Überhitzung
CO ₂ /CO	< 3 oder > 10	CO ₂ und CO	Thermische Degradation von Zellulose
C ₂ H ₂ /H ₂	> 2	C ₂ H ₂ und H ₂	Undichtiges Lastschaltergefäß

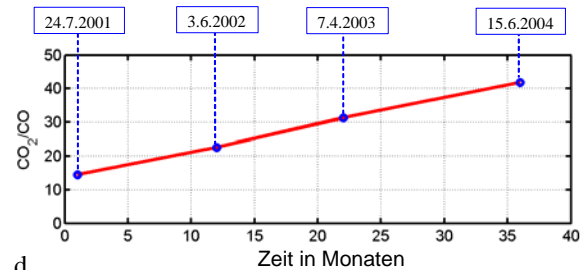


Bild 5 a. Ergebnisse der Gas-in-Öl Analysen
b. Quotienten nach dem MSS-Schema
c. Auswerteprinzip auf Basis von Schlüsselgasen und Schlüssel-Gas-Quotienten
d. zeitliche Entwicklung des Quotienten CO₂/CO

Bild 5b zeigt die gemäß dem MSS-Schema (MSS = Müller, Soldner, Schließing) auszuwertenden Quotienten. Ein anderes, später entwickeltes Verfahren benutzt Schlüsselgase sowie die Schlüsselgas-Quotienten, um auf einfache Weise Defekte in Transformatoren bestimmen zu können. **Bild 5c** zeigt das Prinzip der Auswertung von Schlüsselgasen und Schlüsselgas-Quotienten.

Die Kriterien gemäß dem MSS-Schema geben keinen eindeutigen Hinweis auf einen bestimmten Fehler. Das Verfahren der Schlüsselgas-Quotienten und Schlüsselgase ist hier aussagefähiger. Ein Quotient $CO_2/CO > 10$ deutet auf eine thermische Degradation der Zellulose hin. Bei dem 110-MVA-Maschinentransformator sind die Werte des Quotienten CO_2/CO auffällig hoch. Der Quotient CO_2/CO steigt kontinuierlich – und nahezu linear – mit der Zeit an (**Bild 5d**). Dies ist ein deutliches Zeichen für die zunehmende thermische Degradation der Papierisolation, hauptsächlich der US-Wicklung – wie durch die visuelle Inspektion bekannt ist.

6 380-MVA-Maschinentransformator

6.1 Visuelle Inspektion

Am Wicklungsaufbau des 380-MVA-Transformators, Baujahr 1971, zeigten sich keinerlei mechanische Deformationen oder sonstige Besonderheiten. Das Isolierpapier der Kupferleiter wies einen dunkelbraunen Farbton auf und war in seiner Struktur größtenteils noch fest. Am Wicklungsblock der Phase U fiel eine Schwärzung des Kernblechs im Bereich der US-Ausleitung auf, die auf eine starke thermische Beanspruchung in diesem Bereich hinweist. Im Bereich der Ausleitung der OS-Wicklung wurde ebenfalls eine starke thermische Beanspruchung festgestellt. Das Papier war dort stark geschwärzt, außerdem kam es an der Ausleitung zur Bildung von Ölkohle bzw. Ölschlamm.

6.2 DP-Analyse

An dem Maschinentransformator wurden nur am Schenkel W und dort am Umfang der Wicklung an einer Stelle Materialproben entnommen. **Bild 6** zeigt ein Schnittbild des Wicklungsaufbaus mit den Entnahmestellen der Papierproben der Kupferleiter in axialer Richtung und den dort jeweils festgestellten DP-Werten.

Die US-Wicklung war als Lagenwicklung mit 4 Lagen aufgebaut. Aufgrund der Stärke der Drilleiter waren nur die äußeren Lagen sowie an einer Stelle die nächst innere Lage zugänglich. Nur am oberen Wicklungsende konnten an allen 4 Lagen Materialproben entnommen werden. An der OS-Wicklung wurden Papierproben außen, innen und – da sie als

Scheibenwicklung ausgeführt war – auch in der Mitte der Wicklung entnommen.

Bild 6 zeigt die axiale Verteilung der DP-Werte. Der tiefste festgestellte DP-Wert liegt bei $DP = 70$ und wurde in der Mitte der OS-Wicklung bei 75 % der Wicklungslänge (von unten) festgestellt. Dies ist plausibel, da die OS-Scheibenwicklung zwar Gitterkanäle zur Kühlung aufweist, diese sind jedoch weniger effektiv, als die Kühlkanäle zwischen den einzelnen Lagen der US-Wicklung. Offensichtlich trat der Heißpunkt nicht am oberen Ende der Wicklung auf, sondern im Inneren der OS-Wicklung im Bereich um 75 % der Wicklungslänge.

Aus der Darstellung der ermittelten DP-Werte in einem Diagramm (**Bild 7**) erkennt man deutlich die Schrägeigung des Verlaufs. Tendenziell sind die DP-Werte am oberen Ende am niedrigsten und am unteren Ende am höchsten.

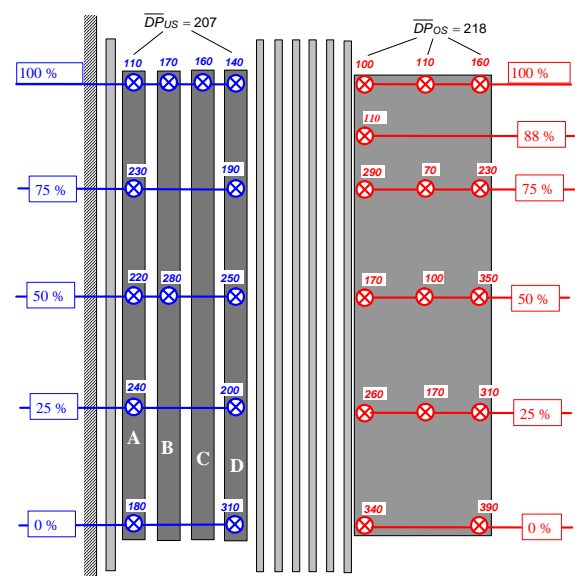


Bild 6 Wicklungsaufbau des 380-MVA-Maschinentransformators und DP-Werte der Materialproben, die an den gekennzeichneten Orten des Schenkels W entnommen wurden

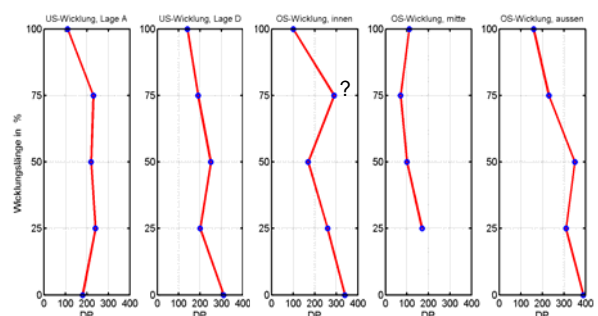


Bild 7 Ergebnisse der DP-Analysen der Materialproben an den in **Bild 6** eingezeichneten Entnahmestellen der Materialproben; ?: möglicher Analysefehler

Mit dem beschriebenen Verfahren für die Auswahl der relevanten DP-Werte zur Berechnung der Mittelwerte und der Varianz bzw. Standardabweichung erhält man:

$$\overline{DP}_{US} = \frac{1}{10} \cdot \sum_{\text{Lagen A,D}} DP_{US,k} = 207 \quad \overline{DP}_{OS} = \frac{1}{14} \cdot \sum_{k=1}^{14} DP_{OS,k} \approx 218$$

$$s_{OS} = \sqrt{\frac{1}{13} \cdot \sum_{k=1}^{14} (DP_{OS,k} - \overline{DP}_{OS})^2} = 106$$

$$s_{US} = \sqrt{\frac{1}{9} \cdot \sum_{k=1}^{10} (DP_{US,k} - \overline{DP}_{US})^2} = 57$$

Entgegen den vorgenannten Regeln wurden die in der Mitte der OS-Wicklung bestimmten DP-Werte ebenfalls zur Mittelwertbildung herangezogen, da das Fehlen des letzten Wertes bei 0 % keinen allzu großen Fehler bedeutet.

Um einen mittleren DP-Wert für die gesamte Papierisolation der Wicklungen eines Transformators zu bestimmen, sollten etwa gleich viele Materialproben aus allen Wicklungen vorliegen. Prinzipiell könnte man zwar mit den Mittelwerten arbeiten, wenn jedoch der Mittelwert für eine Wicklung aus sehr wenigen Einzelproben bestimmt wurde, liegt möglicherweise eine recht hohe Unsicherheit dieses Wertes vor. Im vorliegenden Fall liegen die Zahlenwerte der „mittleren DP-Werte“ dicht beieinander, außerdem liegen genügend Einzelproben vor und man erhält:

$$\overline{DP}_{Wicklungen} = \frac{1}{2} \cdot (\overline{DP}_{OS} + \overline{DP}_{US}) \approx 212$$

Die Wicklungen des untersuchten Maschinentransformators sind gleichmäßig gealtert, was für die gute thermische Auslegung des Transformators spricht. Die mittleren DP-Werte beider Wicklungen liegen nur wenig über dem kritischen Wert von $DP_{krit} \leq 150 \dots 200$, ab dem die Zellulose nach den geltenden Regeln der Technik in ihrer mechanischen Festigkeit als betriebsuntauglich angesehen wird [2]. Sowohl der ermittelte Tiefstwert als auch der Mittelwert des DP weisen auf das Lebensdauerende des untersuchten Maschinentransformators hin.

6.3 Gas-in-Öl Analyse

In **Bild 8** ist die zeitliche Entwicklung des Quotienten CO_2/CO dargestellt. Bereits der Anfangswert der Darstellung im November 1996 liegt mit einem Wert von ca. 15 deutlich über 10. In der Zeit bis zur Außerbetriebnahme der Transformatoren im Jahr 2003 steigt das Verhältnis CO_2/CO auf einen Wert von ca. 23 an und liegt damit deutlich über 10. Insgesamt zeigt der Quotient CO_2/CO eine steigende Tendenz während der letzten Betriebsjahre. Diese beiden Faktoren geben unmittelbar einen Hinweis auf eine deutlich fortgeschrittene thermische Degradation der Zellulose, wie sie auch im Rahmen der Verschrottung festgestellt wurde. Auch an ande-

ren Transformatoren hat sich die Bewertung der zeitlichen Entwicklung des Quotienten CO_2/CO hinsichtlich der thermischen Degradation der Zellulose als sehr aussagekräftig erwiesen.

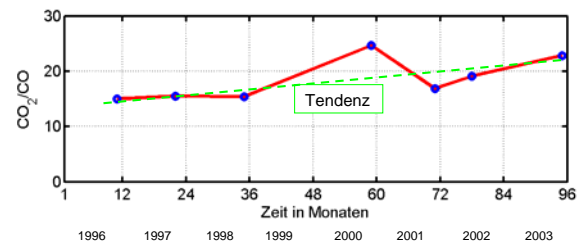


Bild 8 Zeitliche Entwicklung des Quotienten CO_2/CO im Fall des 380-MVA-Maschinentransformators

7 Zusammenfassung

Aus beschleunigten Alterungsversuchen an Transformerboard kann ein Zusammenhang zwischen der Reduktion des DP-Wertes und der Reduktion der mechanischen Zugfestigkeit ermittelt werden. Demnach bedeutet ein DP-Wert von 200 etwa eine Reduktion der Zugfestigkeit von Transformerboard auf 50% des Anfangswertes. Dies nach den gültigen Regeln der Technik als Lebensdauerende der Feststoffisolation von Leistungstransformatoren angesehen.

Bei beiden Maschinentransformatoren mit einer Betriebsdauer von etwas über 30 Jahren wurden DP-Werte von weit unter 200 festgestellt. Die Transformatoren waren somit entsprechend den gültigen Regeln der Technik an ihrem Lebensdauerende angekommen. Dies dürfte dann aber in gleicher Weise auch auf andere Maschinentransformatoren mit ähnlichem Alter und ähnlicher Auslastung zutreffen, zumal bei diesem Transformator keine Defekte festgestellt wurden, die für eine forcierte Alterung verantwortlich gewesen sein könnten.

8 Literatur

- [1] HP. Moser/V. Dahinden, „Transformerboard II“, H. Weidmann AG, CH-8640 Rapperswil, 1987, S. 153/154
- [2] I. Höhle, A. J. Kachler: „Ageing of Cellulose at Transformer Service Temperatures. Part 2. Influence of Moisture and Temperature on Degree of Polymerization and Formation of Furanic Compounds in Free-Breathing Systems“, IEEE Electrical Insulation Magazine, September/October 2005, Volume 21, Number 5, ISSN 0883-7554
- [3] L. Papula: „Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Band 1-3“, 4. Auflage, Verlag Vieweg, 2001, ISBN 3-528-34937-9