**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:** 73 (1982)

**Heft:** 7

**Artikel:** Aktuelle Probleme bei Leistungstransformatoren

**Autor:** Christen, A. / Kreuzer, J.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-904953

**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:** 10.12.2025

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

# Aktuelle Probleme bei Leistungstransformatoren

**Bericht über das Kolloquium des CIGRE Study Committee 12 vom September 1981 in Boston (USA)**

## 1. Transformatorzustand und vorbeugende Wartung

### *1.1 Mechanische Aspekte*

In einem einleitenden Vortrag berichtete *G. Le Roy* (F) über die von der Electricité de France festgelegten Zwei- und Vierjahreszyklen für die mechanischen Transformatorkontrollen. Die zweijährigen Kontrollen umfassen:

- externe Inspektionen (Dichtheit, Verschraubung, Erdung usw.)
- Ölkontrolle (Aufbereitung, wenn Durchschlagspannung $< 30$ kV/2,5 mm)
- Reinigung (Durchführungen, Kühler, Ventilatoren usw.)
- Lastschalter-Funktionskontrolle
- Überprüfung der Mess- und Kontrollapparate

Die vierjährigen Kontrollen umfassen zusätzlich:

- Ölkontrolle (Säurezahl; über 0,6 mg KOH/g Öl regenerieren oder Austausch)
- Lastschalter (Mechanik, interne Inspektion, Reinigung, Ölwechsel; mindestens nach je 70000 Schaltungen)
- Temperaturrelais-Einstellung
- Überprüfung der Hochstromverbindungen
- Inspektion der Pumpen und Ventilatoren
- Anstrich (Rost)

Die häufigsten mechanischen Fehler sind erfahrungsgemäss Öllecks, Korrosion, Pumpen- und Ventilatorfehler, Kühlerschäden, äussere Hilfskreis-Kurzschlüsse.

Für die mechanische Kontrolle der Transformator-Innenteile gibt es nur wenige Inspektionsmöglichkeiten von aussen: die Kontrolle auf Zunahme von Vibrationen und Geräuschen sowie die Infrarotkontrolle bezüglich Heisspunkten. Die Inneninspektion ist aufwendig und nur dann angebracht, wenn bereits Fehleranzeigen vorliegen.

Von der anschliessenden Diskussion der vorbereiteten Fragen sollen die wichtigsten Angaben herausgegriffen werden:

- Korrosionsprobleme sind nicht sehr gravierend; Alu-Radiatoren bewähren sich, sind aber teuer.
- Die Ölüberwachung erfolgt mehr und mehr durch periodische Gasanalysen.
- Betreffend Feuchtigkeitsaufnahme des Öls wurden z.B. von einem 200-MVA-Transformator folgende Zahlen genannt: 5 ml/Monat, entsprechend ca. 1,5 ppm/Jahr; Neuöl-Sättigungswert ca. 60 ppm. Der Membranabschluss ist umstritten wegen zusätzlicher Probleme im Betrieb.
- Die Firma Reinhausen machte bezüglich der Lastschalter die Angaben der Tabelle I. Von russischer Seite wurde angegeben, dass die Lastschalter-Ölhaltespannung von 22 kV/2,5 mm im Betrieb nicht unterschritten werden darf.

### *1.2 Elektrische Aspekte*

Im Einführungsvortrag von *A.L. Rickley* (USA) wurde zunächst die wirtschaftliche Seite anhand einer USA-Nuclear-Versicherungsstatistik (1979) für Transformatoren $\geqq 100$ MVA über eine Periode von 4 Jahren aufgezeigt. Die Reparaturkosten an 8 Einheiten beliefen sich dabei auf über 6 Mio Dollar, ohne indirekte Verluste. Nach einer Fünfjahresstatistik einer anderen USA-Versicherungsgesellschaft liegen 88% der Fehlerursachen in der Wicklungs- und Schaltleitungsisolation sowie an den Durchführungen; die restlichen 12% betreffen hauptsächlich die Lastschalter. Die Fehlerkostenzunahme der letzten Zeit wurde als ziemlich «dramatisch» bezeichnet.

Die anschliessende Diskussion betraf verschiedene Detailgebiete, wobei besonderer Akzent auf die vorbeugenden elektrischen Prüfungen und Kontrollen gelegt wurde:

*Haupt- und Wicklungsisolation:*

- Isolationswiderstand, abhängig von der Temperatur, der Feuchtigkeit und vom Dielektrikum-Verhältnis fest/flüssig.
- Feuchtigkeitsgrad der Papierisolation; Sättigungswert ca. 16% des Gewichtes; bei guter Trocknung $\leqq 0{,}5$%, für Hochspannungstransformatoren jedoch 0,3–0,2%.
- Für Transformatoren im Betrieb sind 2–3% Feuchtigkeitsgehalt noch als normal anzusehen (bei wesentlich höheren Werten Aufbereitung); die Durchschlagspannung ist eine Funktion der Temperatur und der Feuchtigkeit; letztere kommt nicht nur von aussen in den Transformator, sondern entsteht auch durch Zellulosezersetzung unter Sauerstoffeinwirkung innen; die Feuchtigkeit fördert ferner den Alterungsprozess des Dielektrikums, besonders in Heisspunkten und bei Überlast.
- Verlustwinkel ($\mathrm{tg}\,\vartheta$); kein direktes Mass für die Feuchtigkeit zwischen den Wicklungen, aber immerhin ein Relativmass über den allgemeinen Trocknungszustand (Messung: Wicklung–Wicklung sowie Wicklung–Erde unter Temperatur-Registration, flache Charakteristik für trockene Papier- oder Boardisolation). Zwischen 1970 und 1980 wurden in den USA ca. 3100 neue Transformatoren bei $\sim 20$ °C gemessen, wobei der $\mathrm{tg}\,\vartheta < 0{,}5$% war; die grösste Häufigkeit lag bei 0,25% (Papier/Board-Öl-Isolation, Messung ohne Durchführungen zwischen HS und NS); die Übereinstimmung mit den reinen Materialcharakteristiken für Papier/Board $\rightarrow \mathrm{tg}\,\vartheta \approx 0{,}25/0{,}5$% bei 20 °C ist damit ziemlich gut. KEMA (NL) gibt für neue Transformatoren $\mathrm{tg}\,\vartheta < 0{,}6$% bei 30 °C an; periodische Kontrollen werden als sehr nützlich angesehen.

*Eisenkernisolation und Erdung:*

Eine gute Eisenkernerdung ist Voraussetzung für einwandfreie Spannungsverhältnisse im Transformator, so dass es zu keinen statischen Entladungen kommen kann. In diesem Zusammenhang sollten speziell nach Land- und Seetransporten bei der Montage noch mögliche Stichkontrollen gemacht werden, um eventuelle Unterbrechungen oder Doppelschlüsse festzustellen. Die schwache Diskussion dieses Themas verriet aber eher geringes Interesse, wahrscheinlich weil bei den heutigen bolzenlosen und glasfaserverspannten Eisenkernen die Problematik ungleich geringer ist als in der Vergangenheit.

*Öltest:*

- Routinetest: Spannungsprüfung (Durchschlagfestigkeit)
- Spezialtests: $\mathrm{tg}\,\vartheta$, Grenzflächenspannung, Farbe, spezifisches Gewicht, Stockpunkt, Viskosität, Säure- bzw. Neutralisationszahl. Mit dem periodischen Routinetest sollten ein oder zwei Spezialtests kombiniert werden.
- Gasanalyse: Die Gaschromatographie an Ölproben hat in den letzten Jahren ein breites Interesse erlangt, um beginnende Fehler frühzeitig zu erkennen. Die Interpretation ist allerdings nicht so einfach, zumal auch grosse Gasanteile aus der Atmosphäre (Volumen-Sättigungswerte der jeweiligen Gase allein: Sauerstoff $\approx 17$%, Stickstoff $\approx 9$%, Kohlendioxyd sogar $\approx 100$%) und von der normalen Alterung herrühren. Zurzeit sind Entwicklungen von Gasdetektoren im Gange, um eine kontinuierliche und automatische Gasüberwachung an wichtigen Grosstransformatoren in einfacher Weise durchführen zu können (GETOM von General Electric, Apparat von Westinghouse noch in Entwicklung).

*Revisionsperioden der Lastschalter (Reinigung, Überprüfung und Ölwechsel)* — Tabelle I

| Schalterart | Nennstrom | Zahl der Schaltungen |
|---|---|---|
| 3phasig | 300 A | 100 000 |
| | 500 A | 70 000 |
| | 1000 A | 50 000 |
| | 1600 A | 30 000 |
| | 500 A | 100 000 |
| 1phasig | 1000 A | 70 000 |
| | 2000 A | 50 000 |
| | 3000 A | 30 000 |

– Konsequenzen: Hinsichtlich Ölaufbereitung, Regenerierung oder Erneuerung wurden bisher keine Grenzwerte fixiert, die IEC-Publikation 422 gibt nur allgemeine Definitionen; für Paraffinöl liegen weniger Erfahrungswerte vor als für Naphthenöl (Ölfeuchtigkeitsgehalt: Neuöl $\approx$ 8 ppm, Sättigungswert $\approx$ 50 ppm).

*Tests an Ausrüstungen, Zubehör und Schutzeinrichtungen:*

An normalen Durchführungen können Kontrollmessungen mittels Kapazitätsanzapfungen durchgeführt werden. Wichtiger sind dagegen Pressdruckkontrollen bei Öl-$SF_6$-Durchführungen ohne Zwischenölbox. Im Zusammenhang mit den elektrischen Prüfungen von Lastschaltern wurde auf die Kontrolle eventuell eingebauter, nichtlinearer Widerstände hingewiesen. Routinemässig erfolgt die elektrische Überprüfung der Hilfsstromkreise, einschliesslich Pumpen- und Ventilatormotoren.

Was die Schutzeinrichtungen betrifft, wurde hauptsächlich an die Ableiter, Überspannungsregler und Abschalteinrichtungen gedacht.

### *1.3 Dokumentation und Produktehaftung*

Die Wartung bzw. die Prüfungen in der Anlage sind mit Kosten verbunden und können sogar zu zusätzlichen Fehlern führen. Deshalb ist einerseits eine genaue Dokumentation nötig, und andererseits müssen die Resultate exakt aufgezeichnet sowie zentral registriert werden, um auch statistische Rückschlüsse zu ermöglichen. Mit diesen gesammelten Erfahrungen wird ein fruchtbarer Dialog zwischen Benutzer und Erzeuger aufkommen, der in einer entsprechenden Revision von zukünftigen Spezifikationen seinen Niederschlag finden kann.

Zum Thema der Produktehaftung wies R. Baehr (BRD) in seinem Einführungsvortrag auf die Bestrebungen des Rates der Europäischen Gemeinschaften hin, die verschiedenen Gesetzgebungen der Mitgliedstaaten zu vereinheitlichen. Es zeichnet sich in Europa eine flexiblere Lösung als in den USA ab.

## 2. Belastungs- und Überlastgrenzen von Grosstransformatoren

### *2.1 Belastungspraxis*

In seinem Einführungsvortrag befasste sich I. C. de Kuijper (NL) mit der Vielfalt der Anwendungsgebiete von Grosstransformatoren: Generator-Aufspanntransformatoren, Übertragungs-Kuppeltransformatoren, Unterstations-Verteiltransformatoren und Industrietransformatoren. Bezüglich Schwere und Dauer der Belastung sind für abnormale Zustände sowie Notbetrieb Festlegungen in Abhängigkeit der Dauer und der Temperaturparameter nötig. Bei geplanten Überlasten oberhalb der Leistungsschilddaten sollte vergleichend zwischen dem ökonomischen Effekt und der Lebensdauereinbusse bewertet werden, wobei auch das Risiko abzuschätzen ist.

Die anschliessenden Diskussionsbeiträge befassten sich mit den verschiedenen Kriterien bezüglich der variantenreichen Belastung, den Begrenzungen durch die Lastschalter, Verbindungen und Durchführungen sowie mit der selektiveren Überwachung. Die wichtigsten Angaben zur Belastungspraxis seien kurz angeführt.

*Schweden:* Generatortransformatoren speziell von Kernkraftwerken werden nicht überlastet; Netztransformatoren bekommen längere tägliche Überlasten, in Notfällen 40 bis 70%; Temperaturüberwachung mit Infrarotbeobachtung und Gasanalyse (teils täglich).

*Kanada/USA:* Speziell in Kanada sind Überlasten bis zum zweifachen Nennstrom üblich; von zwei Defekten als Folge davon wurde berichtet; die zugelassenen Überlasttemperaturen sind ziemlich hoch ($Öl_{max}$ = 110, Wicklungs-Hot-spot 140, Eisenkern 140, Kessel und Eisenteile sogar 180 °C).

*Übriges Europa:* Eher zurückhaltend mit starken Überlasten bei Grosstransformatoren, speziell in Deutschland.

### *2.2 Belastungsgrenzen für Grosstransformatoren*

*Thermische Alterung:* Die Isolationslebensdauer ist identisch mit der Transformatorlebensdauer. Eine alte Regel besagt, dass + 8 °C Dauerübertemperatur die Lebensdauer auf die Hälfte reduziert. In chemischer und physikalischer Richtung haben sich die Ansichten in den letzten Jahren weder stark verändert, noch sind besondere Neuerkenntnisse geschöpft worden. Lediglich die Gasanalyse brachte einen Fortschritt in der Überwachung der Zellulose bzw. der Beurteilung ihres Zersetzungsgrades (Gehalt CO, $CO_2$, $H_2O$).

*Kurzschlussfestigkeit in Abhängigkeit der thermischen Überlastung:* Es konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den thermischen Expansions- bzw. Kontraktionsbewegungen der Spulen bei spontanen Überlasten und der Kurzschlussfestigkeit gefunden werden.

*Mechanische Festigkeit des Papiers als Alterungsmass:* Diesbezüglich wurde viel an Modellen experimentiert. Der einfachste Test besteht in der Papiererwärmung auf 150–200 °C in Abhängigkeit der Zeit und Bestimmung der Verminderung der mechanischen Reissfestigkeit, z. B. auf 50% des Ausgangswertes. Daneben spielt natürlich auch die elektrische Papierqualität nach der Alterung eine wichtige Rolle, wodurch das Problem ziemlich komplex wird.

*Gasblasenentwicklung bei Übertemperatur:* Modellversuche an papierisolierten Leitern ergaben Gasblasenentwicklung ab 140 °C, wobei der Feuchtigkeitsgehalt infolge Wasserdampfbildung eine Hauptrolle spielte; von Einfluss war zudem ein eventueller Unterdruck an der Öloberfläche. Gleichzeitig zeigte sich eine starke Reduktion der elektrischen Festigkeit; Stoss- und Wechselspannungsfestigkeit sanken auf ca. 40% ab, die Teilentladung begann gleichzeitig mit der Gasblasenbildung und löschte erst wieder bei $\sim$ 60 °C. Setzt man bei 90 °C den Risikofaktor = 1, so steigt er bei 100/120/140 °C auf 80/15000/1000000, womit die Gefahr deutlich genug demonstriert ist. Neben $H_2O$-Dampfblasen entstehen hauptsächlich CO und $CO_2$ und in geringerem Masse $CH_4$; Tabelle II enthält diesbezügliche Angaben aus Frankreich, in Volumen-ppm als Funktion der Temperatur. Der Sauerstoffgehalt lag dabei zwischen 1000 und 2000 ppm.

*Streuflusserwärmung (Kessel, Eisenteile, Schilde):* Untersuchungen bestätigen, dass man hier höhere Temperaturen zulassen kann (140–180 °C) als bei isolierten Leitern; für kurze Dauer ist die Ölschädigung bzw. -alterung erträglich.

### *2.3 Neuer «Loading Guide» (USA)*

Der bisherige Loading Guide (ANSI C 5792, IEEE-Committee) ist auf Transformatoren $\leqq$ 100 MVA beschränkt und für grössere Einheiten zu konservativ. Deshalb ist ein neuer Loading Guide in Bearbeitung, wobei Rücksicht genommen wird auf grössere Streuflüsse, Kurzschlusskräfte, elektrische Feldstärken sowie auf voluminösere Isolationen (Hot spot) und die Kühlungsart (OD). Bei tieferen Umgebungstemperaturen wäre eine einfache Überlastregel wünschenswert; neben zeitabhängigen Überstromgrenzen sollte man auch eine Überspannungslimite festlegen.

Vorschläge (IEEE) für einen neuen Loading Guide, bei Kurzzeitbelastungen:

| | |
|---|---|
| Generator-Aufspanntransformatoren | 100–110% |
| Übertragungs-Kuppeltransformatoren | 130–170% |
| Unterstations-Verteiltransformatoren | 150–200% |
| Temperaturgrenzen | nach Tabelle III |

Falls keine einfachen Spezifikationsgrundlagen geschaffen werden können, müssen ergänzende Leistungsschild-Definitionen erfolgen.

*Gasblasenentwicklung bei Übertemperatur* Tabelle II

| Gas | 150 °C | 200 °C | 300 °C |
|---|---|---|---|
| CO | $4 \cdot 10^{-3}$ | 0,10 | 1,60 |
| $CO_2$ | $4 \cdot 10^{-2}$ | 0,56 | 5,00 |
| $CH_4$ | $5{,}6 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ | $4{,}3 \cdot 10^{-2}$ |

*Temperaturgrenzen nach dem zukünftigen Loading Guide* Tabelle III

| Dauer in Stunden pro Tag | $Öl_{max}$ (°C) | Isolierte Leiter Hottest spot (°C) |
|---|---|---|
| Dauerbetrieb | 105 | 110–120 |
| 4–6 | 105–110 | 120–140 |
| 1 | 110 | 140–180 |

### 3. Entwicklungstendenzen bei der Auslegung sowie im Betrieb von Grosstransformatoren und Kompensationsdrosselspulen

Einleitend erfolgte eine Präsentation von Forschungsvorhaben in den USA, welche teils von den Elektrizitätsversorgungs-Unternehmungen, teils vom Staat (United States Department of Energy) unterstützt werden.

Das *METGLAS-EPRI-Programm* umfasst die Entwicklung eines neuartigen verlustarmen magnetischen Materials, einer Kombination von Metall und Glas, welche in Streifen von 170 × 0,09 mm hergestellt und dann mit einer Isolierschicht überzogen wird. Das neue Material METGLAS ist sehr hart und erfordert spezielle Fabrikationsmethoden, dafür sind die Verluste nur ca. $^1/_4$ so gross wie bei kornorientiertem Blech, und das Verhältnis von Hysteresis- zu Wirbelstromverlusten beträgt 3:1 (Tabelle IV).

Die Anwendung des neuen Materials beschränkt sich vorläufig auf die Herstellung von Wickelkernen für Verteiltransformatoren. Es wird aber nicht ausgeschlossen, dass später auch geschichtete Kerne aus METGLAS hergestellt werden können. Die Hauptvorteile dieses Materials liegen im geringeren Energieaufwand bei der Herstellung (20% desjenigen von kornorientiertem Blech), in den geringeren Verlusten (wichtig wegen der zunehmenden Tendenz zur höheren Verlustbewertung) und im besseren Widerstandswert. Nachteilig sind die tiefere Sättigungsinduktion, die Tatsache, dass METGLAS nicht geformt werden kann, und die hohen Herstellungskosten. Da in den USA aber ein eindeutiger Trend zur immer höheren Kapitalisierung der Leerlaufverluste besteht (Tabelle V), überwiegt der Vorteil der geringeren Verluste.

Bei der *Zweiphasenkühlung* werden gegenwärtig zwei Systeme entwickelt: das Immersed-System und das Gas/Vapor-System. Beim *Immersed System* befinden sich die Wicklungen in einem separaten Tank mit einer Kühlflüssigkeit (z. B. Perchloräthylen $C_2Cl_4$), welche praktisch nicht brennbar ist. Das Risiko der Brennbarkeit wird nicht wesentlich erhöht, wenn man der Kühlflüssigkeit zur Verbesserung der dielektrischen Eigenschaften ca. 25% Transformatoröl zugibt. Zwischen dem Wicklungskessel und dem eigentlichen Transformatortank wird zur Intensivierung der Kühlung die Verdampfungswärme des unter Überdruck stehenden Kühlmittels ausgenützt. Dies ermöglicht höhere Stromdichten (Hot spot 180 °C), kleinere oder keine Kühlkanäle, grössere Lebensdauer und geringere oder gleiche Herstellungskosten wie bei Öltransformatoren. Beim *Gas/Vapor-System* wird die Kühlflüssigkeit von oben über die Wicklungen und den Kern gesprüht und vaporisiert. Für die Startphase wurde bei einem Prototyp der Kessel mit $SF_6$ gefüllt, anschliessend erfolgte nach Belastung des Transformators der Einsatz der Dampferzeugung mit Hilfe des Sprühmittels (Fluorcarbon).

Im Rahmen des *Transformator-Reaktor-Subprogramms* des Research Centre von San Franzisko wurden verschiedene Messgeräte entwickelt:

*Vergleichswerte von METGLAS und kornorientiertem Transformatorblech* Tabelle IV

| Grössen | | METGLAS | Kornorientiertes Blech |
|---|---|---|---|
| Koerzitivkraft | $H_c$ | 4,8 A/m | 7,2 A/m |
| Remanenz | $B_r$ | 1,12 T | 1,05 T |
| Sättigung (25 °C) | $B_s$ | 1,61 T | 2,03 T |
| Verluste (1,4 T/60 Hz) | $P_w$ | 0,26 W/kg | 0,88 W/kg |
| Scheinleistung (1,4 T/60 Hz) | $P_s$ | 1,21 VA/kg | 1,21 VA/kg |
| Füllfaktor | $\varphi_k$ | 0,80 | 0,96 |
| Widerstand | $R$ | $125 \cdot 10^{-6}$ Ωcm | $48 \cdot 10^{-6}$ Ωcm |

*Trend für die Bewertung der Leerlaufverluste in den USA* Tabelle V

| Jahr | 1975 | 1980 | 1985 | 1990 |
|---|---|---|---|---|
| Kapitalisierung | 500 $/kW | 2000 $/kW | 4000 $/kW | 10 000 $/kW |

*Vergleichswerte Gastransformator gegenüber konventionellem Öltransformator* Tabelle VI

| Grössen | | Öltransformator | Gastransformator | Einsparung in % |
|---|---|---|---|---|
| Magnetblech | t | 26,5 | 22,7 | 14 |
| Kupfer | t | 12,4 | 6,1 | 51 |
| Totalgewicht ohne Öl/Gas | t | 62,1 | 44,1 | 29 |
| Totalgewicht mit Öl/Gas | t | 86,0 | 44,8 | 48 |
| Kesselvolumen | $m^3$ | 38,5 | 25,5 | 34 |
| Grundfläche | $m^2$ | 12,4 | 13,8 | 11 |
| Höhe | m | 7,9 | 4,2 | 47 |
| $J^2R$-Verluste | kW | 179 | 145 | 19 |
| Streuverluste | kW | 69 | 63 | 9 |
| Lastverluste | kW | 248 | 208 | 16 |
| Leerlaufverluste | kW | 47 | 41 | 13 |
| Gesamtverluste | kW | 295 | 249 | 16 |
| Geräuschpegel | dB | 71 | 56 | 21 |

– Partial-Discharge-Detektor auf akustischer Basis (erster Impuls wird als Trigger benutzt); magnetischer Anlegefühler am Transformatorkessel; vorläufig als 1-Kanal-Detektor erhältlich (ca. 2000 $); demnächst soll ein 2-Kanal-Detektor herauskommen, mit dem die TE-Quelle örtlich besser lokalisiert werden kann (Genauigkeit ca. 25 mm).

– Hot-spot-Detektor (Wärmefühler, Sensor); Eigenfrequenz des Detektors ändert sich linear mit der Temperatur; Eindraht-Verbindung nach aussen.

– Optischer Temperatur-Detektor (Fiberoptik).

Aus dem Regierungsprogramm des Energiedepartements für *gasisolierte Transformatoren und Reaktoren* wurde von folgenden Versuchen berichtet: $SF_6$-Gasisolation bei einem Betriebsdruck von ca. 5 bar, welcher die Transformatorkessel stark beansprucht; Eisenkerne mit Längs- und Querkanälen; selbsttragende Lagenwicklungen aus 750...1500 mm breiten Aluminiumbändern mit Kühlnuten, wobei als Ausleitung gestrickte und flachgepresste Alu-Kabel dienen. Isolation mittels Kunststoffolien zwischen den vertikal gekühlten Wicklungslagen, die oben und unten horizontal abgedichtet und über Kunststoffzuleitungen mit dem abgeschlossenen Kühlsystem verbunden sind. Die an vielen Modellen, aber auch an Prototypen erzielten Resultate klingen geradezu phantastisch im Vergleich zu konventionellen Öltransformatoren: höhere thermische und dielektrische Ausnutzung, kleinere Gewichte und Dimensionen bei sogar geringeren Verlusten, niedrigerer Geräuschpegel, höhere Kurzschlussfestigkeit.

Tabelle VI gibt einen Vergleich zur konventionellen Bauweise bei einem gasisolierten Einphasen-Prototyp für 133 MVA, 138/345 kV, 60 Hz in Autoschaltung mit Tertiärwicklung; als Typenleistung auf 50 Hz bezogen ergeben sich ca. 80 MVA. Der Wicklungsfüllfaktor des Gastransformators ist mehr als doppelt so gut, wobei seine optimale Wicklungshöhe bei ca. 1,5 m liegt; darüber bzw. darunter steigen die Gewichte und Verluste dann relativ stark an. Über die voraussichtlichen Kosten kann zurzeit nichts Definitives ausgesagt werden, da noch gravierende technische Probleme gelöst werden müssen.

Die Diskussion des Themas «Entwicklungstendenzen» ergab verschiedene interessante Hinweise.

*Ultra-High-Voltages (UHV)*

– In Russland wird ab 1983 das erste 1250-kV-Übertragungssystem in Betrieb genommen. Transformator-Prototypen (1979): Bankleistung 2000 MVA, Autoschaltung 400/1100 kV; Kurzschlussspannung 11,5%, Prüfung 2550 kV Vollwelle, 2800 kV abgeschnittene Welle, 2100 kV Langwelle.

– Japan hält 1100 kV als wirtschaftlichstes Niveau; geplante Transformatorbänke 3000 MVA, Autoschaltung 525/1100 kV mit Tertiärwicklung.

– Italien berichtete über einen Fehler am 200-MVA/1100-kV-Prototyp gegen den Kessel auf der Unterspannungsseite gegenüber

der Hochspannungsausleitung; vermutliche Ursache ist eine innere Verschiebung beim Transport an den Board-Barrieren (Lichtenbergfiguren). Geplante Bänke: zuerst 1200 MVA, später 2400 MVA; Bahntransport bei 4,6-m-Profil.

*Prüfung von Grosstransformatoren und Reaktoren*

– Frankreich berichtet über Kurzschlussprüfungen 1965/1970: Drehstromtransformatoren 400 MVA/660 MVA, 1975/1980 Einphasenpole zu 1080-MVA/1650-MVA-Bänken bei 400 kV.

– Die USA zeigen eine Resonanzkreisprüfanordnung bei 50/60/200 Hz für Hochspannungsreaktoren bis 1.7 $U_N$, wobei grosse Parallelkapazitäten benötigt werden (Gefahr von Ferroresonanz auf der Hochspannungsseite bzw. Selbsterregungsprobleme auf der Unterspannungs-Speiseseite; Kontrolle über Computer).

*Betriebsdefekte* vorwiegend an sehr grossen 400-kV-Maschinentransformatoren durch Resonanzen (BRD). In Deutschland werden solche Transformatoren im Gegensatz zu anderen Ländern lastgeregelt. Angeregt durch Schaltvorgänge traten transiente Resonanzschwingungen innerhalb der verschachtelten Oberspannungswicklung mehrfach zwischen 5 und 250 kHz auf, wobei es zu schwerwiegenden Defekten kam. Kommentar aus den USA: Problem bekannt, aber sehr selten; kritische Störfrequenzen können ermittelt und durch Vorkehrungen von der Netzseite her beseitigt werden; zusätzliche Transformatorteste scheinen daher nicht gerechtfertigt.

**4. Berichte der «Working Groups» (WG)**

*WG 12-05 Zuverlässigkeit der Transformatoren*

Es wurde ein sehr umfangreiches Tabellenwerk gezeigt, welches die verschiedenen Fehlerarten von Kraftwerkstransformatoren (6522 unit-years), Unterstationseinheiten (32579 unit-years) und Autotransformatoren (7568 unit-years) unterteilt nach Spannungsbereichen von 100 bis 700 kV über 20 Jahre statistisch erfasst. Während die mittlere jährliche Fehlerrate total ca. 3% ohne bzw. ca. 4% mit Stufenschalter ausmacht, steigt sie bei Autotransformatoren mit zunehmender Spannung maximal gegen 11% an; sie liegt bei diesen auch in den letzten Jahren im Durchschnitt über 4%. Transformatoren über 700 kV und Reaktoren wurden nicht in die Statistik aufgenommen. Mitte 1982 erscheint in «ELECTRA» der Schlussbericht.

*WG 12-06 Spezialprobleme sehr grosser Transformatoren*

Behandelte Detailgebiete: Überlast und Übererregung im Zusammenhang mit Gasanalyse, Hot-spot-Probleme, Hochspannungsverbindungen und -anschlüsse, Transport. Auch hier wurde der Schlussbericht für 1982 in Aussicht gestellt.

*WG 12-08 Transformatoranschlüsse bei $SF_6$-Schaltanlagen*

Diese neue WG ist im Entstehen; eine Verbindung mit der WG 23.03 muss hergestellt werden. Vom Cigré-Komitee 12 wurde dieses Gebiet als Vorzugsthema für die CIGRE 1984 akzeptiert.

*A. Christen*, SEV, und *J. Kreuzer*, BBC-Sécheron

# Literatur – Bibliographie

DK: 551.594.221:77 SEV-Nr. A942

**Lightning and its spectrum.** An atlas of photographs. By *Leon E. Salanave*. Tuscon/Arizona, The University of Arizona Press, 1980; 4°, XVIII/136 p., 107 fig., ISBN 0–8165–0374–5. Price: cloth $ 25.–

Der Autor ist Professor der Astronomie am City College in San Francisco, California. Nach seinem Studium in Astronomie verbrachte er 10 Jahre (1960...1970) am Institute of Atmospheric Physics der University of Arizona in Tucson, wo er sich besonders mit der Anwendung astronomisch-optischer Methoden auf das Spektrum des Blitzkanals befasste. In einem Vorwort schildert er, wie er durch seine Forschungsarbeit auf den Gedanken kam, einen «Blitzatlas» zu schaffen, um seine Studenten und weitere Naturfreunde von der Schönheit des Blitzphänomens zu überzeugen. Er hat sich zu diesem Zweck der Mühe unterzogen, über 100 Originale guter Blitzfotos verschiedener Autoren mit den zugehörigen Angaben zu sammeln, auszuwerten und in ausgezeichnet klaren Reproduktionen zu präsentieren.

Der zweite Teil des Buches betrifft die Methodik und Darstellung der Resultate der Spektroskopie des Blitzkanales. Auf diesem Gebiet hat der Autor bahnbrechend gewirkt durch die Anwendung der «spaltlosen Kamera» (splitless camera) für die Blitzphotographie, d.h. für die Auflösung des Blitzlichtes in seine Farben (Wellenlängen). Durch die Anwendung des optischen Gitters gelingt diese Auflösung bereits für die einzelnen Stadien des Blitzstromverlaufes. Auf der Suche nach Fixpunkten grosser Blitzeinschlagshäufigkeit hielt sich der Autor 1964 und 1967 auch in Lugano auf, um die Blitze am Monte San Salvatore mit jenen Arizonas zu vergleichen. Dabei entstand auch eine freundschaftliche Zusammenarbeit mit der schweizerischen FKH.

Als Resultat einer enormen Arbeit liegt heute dieses Buch vor, ein einzigartiges Sammelwerk über die optische Blitzforschung. Die ausgezeichnet klaren Reproduktionen der Blitzfotos werden jeweils kurz besprochen, wobei die einzelnen Fachausdrücke, wie Erdblitz, Wolkenblitz, Mehrfachblitz, Abwärtsblitz, Aufwärtsblitz, Leitblitz, Hauptblitz (return stroke), Streifenblitz und Perlschnurblitz, veranschaulicht werden. Bei der Deutung der Blitzfotos muss stets bedacht werden, dass es sich um die Projektion der Blitzbahn auf die Fotoschicht handelt, so dass z.B. «Verwicklungen» oder einzelne helle Punkte («Kugeln») der Blitzbahn nicht reell sind, was durch gleichzeitige Fotos aus zwei Richtungen bewiesen wird.

Ein ausführlicher Quellennachweis aller Fotos erlaubt die Kontaktnahme mit den Besitzern der Originale. Es ist nicht möglich, die Schönheit der Bilder in Worten zu beschreiben. Zusammen mit dem Begleittext bildet dieser «Atlas» ein prächtiges und seltenes Dokument und ein Erlebnis für alle am Blitz interessierten Leser. *K. Berger*

DK: 621.3.024/.025 SEV-Nr. A937

**Allgemeine Elektrotechnik.** Grundlagen der Gleich- und Wechselstromlehre. Von *Alexander von Weiss*. Braunschweig/Wiesbaden, Friedrich Vieweg-Verlag, 1981; 8°, XI/328 S., 308 Fig., ISBN 3–528–04185–4. Preis: kart. DM 39.50

Dieses Lehr- und Arbeitsbuch behandelt die allgemeinen Grundlagen der Gleich- und Wechselstromlehre zum Einstieg in ein vertieftes Fachstudium und als Vorbereitung für ein besseres Verständnis der theoretischen Elektrotechnik. Es möchte das notwendige Rüstzeug zum Verstehen des physikalischen Geschehens und seiner technischen Anwendungen vermitteln sowie zum ingenieurmässigen Denken anleiten. Die beiden bisherigen Bände «Grundlagen der Gleichstromlehre» und «Grundlagen der Wechselstromlehre» des gleichen Autors wurden zusammengefasst, erweitert und neu bearbeitet. Eingeführt wurde die Behandlung linearer Netzwerke mit Matrizen. Auch ein Abschnitt über Halbleiter ist neu. Leider musste dafür die Behandlung unsymmetrischer Drehstromsysteme fallengelassen werden. Ob diese Wahl glücklich war, möchte der Rezensent bezweifeln. Man hätte ebensogut die trivialen Aussagen über physikalische Grössen, Vektorrechnung und komplexe Zahlen weglassen können. Mit dem mathematischen Rüstzeug eines Fachhochschulstudenten liesse sich der Inhalt genauer darstellen. Die Operatorenrechnung mit komplexen Grössen im Verbrauchersystem der Wechselstromlehre ist nicht genügend transparent dargelegt. Die Suszeptanz $B$ (Imaginärteil der Admittanz $\underline{Y}$) ist z.B. nicht der reziproke, sondern der negativ reziproke Wert der Reaktanz $X$.

Zur Vorbereitung auf die Systemtheorie sind die Anwendungen der Operatorenrechnung in Mehrphasensystemen, oberschwingungshaltigen Schaltungen und allgemeiner Netzwerkanalyse eher knapp. Ein vermehrter Gebrauch der Dualitätsbeziehungen könnte auch helfen die Übersicht zu verbessern. Die straffe Darstellung verlangt vom Leser eigenes Nachdenken und intensives Mitgehen, wenn er zum Erkennen und Verstehen der physikalischen Zusammenhänge gelangen will. *Hs.-Hch. Giger*