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: 87 (1996)

Heft: 21

Artikel: Die Betriebsüberwachung von Transformatoren : Untersuchungen des Isolieröls als unentbehrliches Hilfsmittel in der Diagnostik

Autor: Knab, Hans-Josef

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902381

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: 04.12.2025

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

Neben seinen hervorragenden Eigenschaften als Dielektrikum und Kühlmedium ermöglicht Mineralöl bei entsprechender, regelmässig durchgeführter Kontrolle seines physikalischen und chemischen Zustandes Einblicke in das «Innenleben» des Transformators. Speziell die im Öl gelösten Abbau- oder Zersetzungsprodukte geben wichtige Hinweise auf mögliche Schwachstellen im Inneren des aktiven Teils, lange bevor grössere Folgeschäden eintreten. Neben den klassischen, auf die Ölqualität bezogenen dielektrisch-chemischen Prüfungen spielen die gas- und flüssigchromatographischen Untersuchungen dabei eine herausragende Rolle.

Die Betriebsüberwachung von Transformatoren

Untersuchungen des Isolieröls als unentbehrliches Hilfsmittel in der Diagnostik

■ Hans-Josef Knab

Die Verwendung mineralischer Öle als Isoliermedium ist so alt wie die Hochspannungstechnik selbst. Ging es früher darum, durch Imprägnierung der festen Isoliersysteme und Auffüllen aller leeren Räume für eine Homogenisierung des elektrischen Feldes zu sorgen, so wurde mit der steigenden Leistungsdichte moderner Apparate die zuverlässige Abführung der Verlustwärme aus dem Inneren des Aktivteils immer wichtiger. Die wichtigsten Kriterien für eine moderne Isolierflüssigkeit sind heute also:

- gute dielektrische Eigenschaften (d. h. hohe Durchschlagsfestigkeit, niedriger Verlustfaktor)
- hohe thermische und Oxidationsstabilität
- auch bei Wintertemperaturen ausreichend niedrige Viskosität zur schnellen Abführung der unvermeidbaren Verlustwärme
- hoher Flammpunkt (zur Herabsetzung der Brandgefahr)
- möglichst geringe Schädlichkeit für den Menschen und seine Umwelt
- leichte, umweltverträgliche Entsorgbarkeit oder – noch besser – Wiederverwendbarkeit
- niedriger Einstandspreis

Mineralöl als Isoliermedium

Isolierflüssigkeiten auf Mineralölbasis vermögen alle diese Kriterien weitgehend, wie praktisch keine andere, zu erfüllen. Die heutigen mineralischen Isolieröle sind hoch raffinierte Petroleumdestillate unterschiedlicher Zusammensetzung mit einem Siedebereich von ungefähr 200 bis 400 °C. Zur Verbesserung ihrer Alterungsstabilität können ihnen noch bis zu 0,3 Massen-Prozent eines Oxidationsinhibitors zugesetzt werden. Dazu hat sich das 2,6-*D*i-tertiär-*b*utyl-*p*ara-*c*resol (DBPC) bisher als am besten geeignet erwiesen.

Anforderungen an ungebrauchte Isolieröle

Die an ein ungebrauchtes Isolieröl zu stellenden Mindestanforderungen sind international als IEC-Spezifikation Nr. 296 festgelegt, wobei es den Mitgliedsländern freigestellt ist, noch zusätzliche Forderungen zu stellen. In Tabelle I sind die IEC-Anforderungen den Anforderungen gemäss der deutschen DIN-57370 und VDE-0370 gegenübergestellt.

Adresse des Autors
Hans-Josef Knab, Dipl. Phys, Dr. rer. nat.
Leiter des Labors für Öl- und Gasanalysen
ABB Unifer AG, 5401 Baden
Der Autor ist Mitglied mehrerer Arbeitsgruppen der Cigré WG 15-01 sowie Delegierter des SEV in verschiedenen Task-forces des TC 10 der IEC.

		nach DIN-57370 und VDE-0370, Teil 1		nach IEC-296		
	Einheit	Klasse A	Klasse B	Klasse I	Klasse II	Klasse III
Eigenschaft Reinheit (Aussehen)	—	klar, frei von Feststoffen		klar, frei von Feststoffen		
Kinematische Viskosität bei 40 °C 20 °C –15 °C –30 °C –40 °C	mm²/s	— ≤ 25 — — —	— ≤ 6 — — —	≤ 16,5 — ≤ 800 — —	≤ 11,0 — — ≤ 1800 —	≤ 3,5 — — — ≤ 150
Flammpunkt	°C	≥ 130	> 100	≥ 140	≥ 130	≥ 95
Pourpoint (Temperatur, bei der das Öl gerade noch fliesst)	°C	—	—	≤ –30	≤ –45	≤ –60
Neutralisationszahl	mg KOH/g	≤ 0,03		≤ 0,03		
Korrosiver Schwefel	—	nicht anwesend		nicht anwesend		
Durchschlagsspannung bei Lieferung nach Vorbehandlung	kV	— ≥ 50		≥ 30 ≥ 50		
Dielektrischer Verlustfaktor tg δ bei 90 °C (nach Vorbehandlung)	—	≤ 0,005		≤ 0,005		
Oxidationsstabilität Neutralisationszahl Schlamm	mg KOH/g % (Masse)	≤ 0,30 ≤ 0,06		≤ 0,40 ≤ 0,10		

Tabelle I Anforderungen an ungebrauchte, nichtinhibierte Isolieröle

Die Überwachung der Isolieröle im Betrieb

Durch Oxidation, thermische Belastung und den Kontakt mit den übrigen Baustoffen des Transformators verändern sich die Eigenschaften des Öles – es altert. Für die Betriebsüberwachung des Transformators ist es nun wichtig, die Öleigenschaften, die sich auf die Betriebssicherheit des Transformators negativ auswirken können, zu erfassen. Das sind:

- die Durchschlagsfestigkeit (bestimmt gemäss IEC-Recommendation No. 156) und
- der dielektrische Verlustfaktor tg δ (bestimmt entsprechend IEC-Recommendation No. 247).

Die Bestimmung dieser beiden Grössen gibt aber nur den momentanen Zustand des Öles zum Zeitpunkt der Probenahme wieder. Eine Prognose über die Betriebstüchtigkeit des Transformators während weiterer vier oder fünf Jahre ist aus den Ergebnissen dieser beiden Eigenschaften nicht möglich. Dazu müssen Öleigenschaften herangezogen werden, von denen man weiss, wie sich eine weitere Entwicklung dieser Grössen auf die dielektrischen Eigenschaften des Öles und mit ihm des gesamten Isolationssystems auswirken können. Die in diesem Zusammenhang wichtigsten Eigenschaften sollen hier kurz besprochen werden:

- *Die Neutralisationszahl:* Das zunächst nur aus Kohlenwasserstoffen (Verbindungen, die nur Kohlenstoff und Wasserstoff enthalten) bestehende Mineralöl wird bei Zutritt von Sauerstoff – durch das im Transformator reichlich vorhandene Kupfer beschleunigt – oxidiert, wobei zunächst saure Produkte entstehen, die im Zusammenwirken mit anderen Verunreinigungen im Öl zu höheren dielektrischen Verlusten führen. Im weiteren Verlauf der Alterung treten sie dann zu harzartigen Grossmolekülen zusammen und fallen schliesslich als Schlämme aus. In freien Ölspalten schwimmend, vermindern sie die Durchschlagsfestigkeit des Öles beträchtlich, während sie nach Ablagerung auf den Wicklungsoberflächen die Wärmeabfuhr vermindern und somit zu thermischer Zerstörung der Festisolation führen können.

Die Neutralisationszahl (NZ) wird angegeben in mg KOH/g. Dies ist die Menge Kaliumhydroxid, die zur Neutralisation eines Gramms des Probeöls benötigt wird. Sie ist ein Mass für den Fortschritt der Ölalterung und somit eine wichtige Kenngrösse.

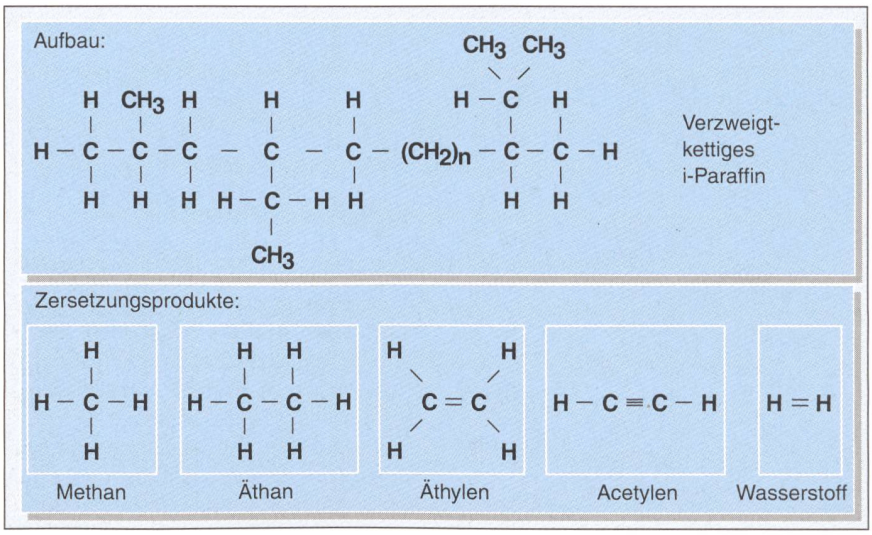


Bild 1 Aufbau und Zersetzungsprodukte des Isolieröls

	Transformatoren und Wandler über 170–420 kV	Transformatoren von 72,5 bis 170 kV	Wandler bis 170 kV
Durchschlagsspannung [kV]	min. 50	min. 40	min. 40
Dielektrischer Verlustfaktor tg δ bei 90 °C	max. 0,2	max. 1,0	max. 0,3
Neutralisationszahl [mgKOH/g]	max. 0,5	max. 0,5	max. 0,5
Grenzflächenspannung [mN/m]	min. 15	min. 15	min. 15
Wassergehalt [mg/kg]	max. 20	max. 40	max. 30

Tabelle II Empfohlene Grenzwerte für Isolieröle in Betrieb (Auszug aus IEC 422)

• *Die Grenzflächenspannung:* Die Grenzflächenspannung ist dagegen ein eher qualitatives, dafür aber sehr sensitives Mass, eine beginnende Ölalterung zu erkennen. Das Messprinzip beruht darauf, die infolge Oxidation gebildeten Tenside («oberflächenspannungsaktive Substanzen») qualitativ nachzuweisen. Allerdings rechtfertigt eine niedrige Grenzflächenspannung allein noch keine übereiligen Sofortmassnahmen, doch hat die Praxis gezeigt, dass sich in einem solchen Fall die dielektrisch-chemischen Parameter ebenfalls rasch verschlechtern. Insofern reiht sich die Bestimmung der Grenzflächenspannung als ein wertvolles Hilfsmittel, das zu erwartende Alterungsverhalten eines Isolieröls in Betrieb zu charakterisieren, abrundend in das Überwachungsspektrum ein.

• *Der Wassergehalt:* Feuchte Fasern oder sonstige Partikel führen zu einer dramatischen Absenkung der Durchschlagsfestigkeit. Die Kenntnis des Wassergehaltes im Öl ist daher für die Beurteilung der weiteren Betriebssicherheit des Transformators von grosser Bedeutung. Seine Bestimmung ist jedoch äusserst problematisch, wenn man bedenkt, dass die aus Zellulose bestehende Papier- oder Pressspanisolation im Feuchtigkeitsgleichgewicht mit dem Öl stehend um Grössenordnungen mehr Wasser enthält, als das Öl bei gleicher Temperatur in Lösung halten kann. Eine Wasserbestimmung im Öl ist daher auch dann nur ein beschränktes Mass für den Zustand des Isolationssystems, wenn die Probenahme im betriebswarmen Zustand erfolgt, ein Entweichen von Wasserdampf verhindert und das beim Erkalten der Probe ausfallende freie Wasser bei der Bestimmung des Wassergehaltes mitberücksichtigt wird.

• *Der Inhibitorgehalt:* Bei inhibierten Ölen ist auch die Bestimmung des Inhibitorgehaltes sinnvoll, wenn man das Öl hinsichtlich seines Oxidationsverhaltens bei Anwesenheit des Inhibitors genau kennt. Die Oxidation eines auf den Inhibitor gut abgestimmten Öls beginnt erst, wenn der Inhibitor bis auf einen kleinen Restgehalt verbraucht worden ist. Bei periodisch durchgeführten Inhibitorbestimmungen lässt sich dieser Zeitpunkt hinreichend genau abschätzen, um rechtzeitig eine Nachinhibierung oder einen Ölaustausch in die Wege zu leiten, bevor die feste Isolation durch Ölalterungsprodukte verunreinigt wird.

Grenzwerte, die für Transformatoren unterschiedlicher Grössenklassen nicht über- oder unterschritten werden sollen, wurden als IEC-Recommendation No. 422 publiziert und sind in Tabelle II wiedergegeben.

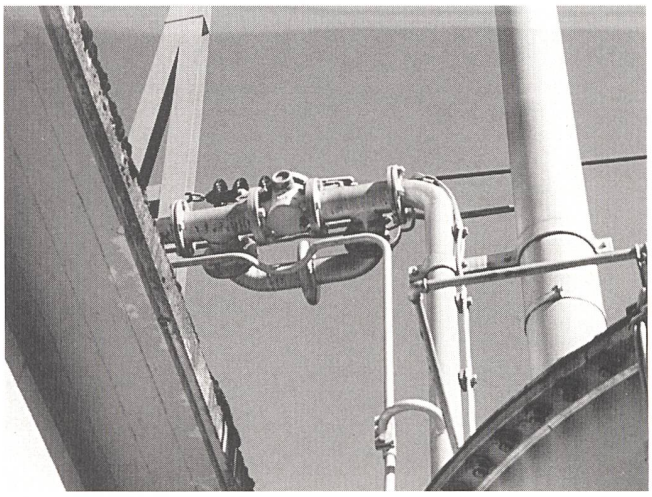


Bild 2 Buchholz-Schutz nur als letzte Instanz

Periodische, vorsorgliche «Gas-in-Öl-Analysen» verringern signifikant die Risiken des Ansprechens des Buchholz-Schutzes.

Die Bestimmung im Öl gelöster Zersetzungsgase

Die bisher beschriebenen Untersuchungen dienen der analytischen Verfolgung der natürlichen, in einem «gesunden» Transformator bei normalem Betrieb ablaufenden Alterungsprozesse. Korrektur- oder Revisionsmassnahmen, deren Notwendigkeiten sich aus der Auswertung der erhaltenen Ergebnisse ableiten lassen, können langfristig geplant und in die Wege geleitet werden. Örtliche thermische Überbelastungen des Isolationssystems oder das Vorhandensein von Teilentladungen innerhalb der Festisolation, die Startpunkt zu weiterer Zerstörung sein und schliesslich zum Ausfall des Transformators führen können, werden auf diese Weise nicht erkannt. Mit der routinemässig durchgeführten Untersuchung der im Isolieröl gelösten Gase (Bild 1) wurde ein völlig neues Kapitel zur Früherkennung örtlicher Unregelmässigkeiten im Isolationssystem aufgeschlagen und eine wichtige Lücke im Überwachungsprogramm für Transformatoren geschlossen.

Vorausgegangen war das von Buchholz (1875–1956) entwickelte und nach ihm benannte Schutzrelais, einer kleinen, am höchsten Ort des Transformatorenkessels angebrachten und mit Öl gefüllten Kammer mit einem Schwimmer, der Alarm auslöst, wenn aufsteigende Gasblasen das Öl aus der Kammer verdrängen (Bild 2). Über ein Probenahmeventil können Gasproben entnommen und einer Analyse zugeführt werden. Anfangs genügte eine Prüfung auf Brennbarkeit. Brennbarkeit war ein Zeichen für Ölzersetzung bei Temperaturen, die weit oberhalb der Auslegungstemperatur liegen. Diese Buchholz-Relais versehen auch heute noch ihren Dienst. Aber selbst wenn die «Buchholzgase» mit den heute

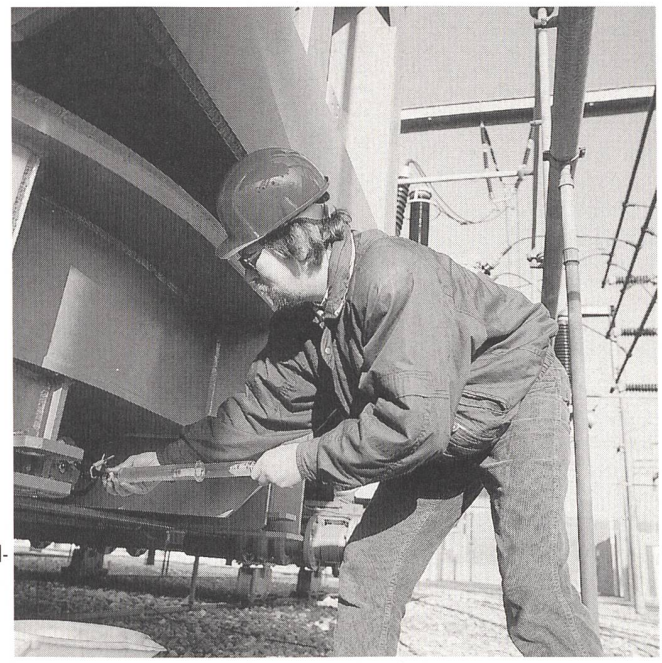


Bild 3 Isolieröl-Probenentnahme

Eine fachgerechte Isolieröl-Probenentnahme ist die unbedingte Voraussetzung für eine aussagekräftige Analyse.

Typ	Fehlerart	typische Gase	Ursache
1	stromschwache Teilentladungen niedriger Energiedichte	hauptsächlich H_2; wenig gesättigte, keine ungesättigten Kohlenwasserstoffe	schlechte Imprägnierung der Festisolation, Lufteinschlüsse
2	stromschwache Teilentladungen mit zum Teil hoher Energiedichte	wie Typ 1 jedoch mit Acetylen+Äthylen	schlechte Kontakte, Entladungen zwischen unterschiedlichen Potentialen
3	thermische Zersetzung bei Temperaturen < ca. 800 °C	gesättigte Kohlenwasserstoffe, mit steigender Temperatur wachsende Mengen Äthylen	Überlastung; hohe Übergangswiderstände, Eisenbrand
4	stromstarke Entladungen hoher Energiedichte	wie 3 mit steigenden Mengen Acetylen und Äthylen und mehr Wasserstoff	Funkenentladungen, Durchschlag

Tabelle III Grund-Fehlerarten, typische Gase und Beispiele für Fehlerursachen [1]

	Konzentrationen in ppm (V/V)	
Betriebszeit	3 Jahre	> 7 Jahre
Wasserstoff H_2	200	250
Methan CH_4	100	200
Äthan C_2H_6	100	200
Äthylen C_2H_4	150	300
Acetylen C_2H_2	15	35
Kohlenmonoxid CO	500	1000
Kohlendioxid CO_2	6000	11000

Tabelle IV Grenzwerte für Zersetzungsgase

Obere Grenzwerte der Konzentrationen von Zersetzungsgasen in fehlerfreien Transformatoren in Abhängigkeit von der Betriebszeit [1].

zur Verfügung stehenden Analysenmethoden genauer bestimmt und aus den Ergebnissen wesentlich weiterreichende Schlüsse gezogen werden können, hat das Verfahren einen wesentlichen Schwachpunkt: Der Buchholzschutz tritt erst in Aktion, wenn das Öl mit Gas gesättigt ist. Bis es soweit ist, vergeht viel Zeit, und eine zum Beispiel in der Festisolation eingeschlossene, anfänglich harmlose Gasblase kann sich zu einer gefährlichen örtlichen Zerstörung des Isolationssystems ausgeweitet haben.

Anhand der Ergebnisse eigener Untersuchungen zeigte E. Dörnenburg, dass es vier Grundfehlerarten gibt, die sich mittels der bei ihrem Auftreten entstehenden Gaszusammensetzungen klar unterscheiden lassen (Tabelle III). Dieses System wurde in internationaler Zusammenarbeit weiterentwickelt und zusammen mit den Richtlinien für die fach- und sachgerechte Probenahme und -aufbereitung in den IEC-Richtlinien Nrn. 567 und 599 niedergelegt (Bild 3). Da diese Interpretationsmodelle nur Rahmenmodelle sind und ohne Berücksichtigung weiterer Faktoren zu kostspieligen Fehlentscheidungen führen können, wird klar, dass die Interpretation der Ergebnisse der Gasanalysen grosser Erfahrung und umfangreicher Kenntnisse der Zusammenhänge und der konstruktiven Besonderheiten des zu beurteilenden Objektes bedarf. Darauf wies schon Dörnenburg hin, indem er darlegte, dass auch fehlerfrei arbeitende Transformatoren Gase entwickeln, deren Gehalte einem Gleichgewichtswert zwischen Gasbildung und Abgabe nach aussen zustreben. Wie sich bei Diskussionen in internationalen Gremien der Cigré oder IEC zeigte, ist die Festlegung von allgemein gültigen Standardwerten für normal arbeitende Transformatoren oder Wandler nicht möglich, da die aus eigenen Erfahrungen entwickelten Vorstellungen der einzelnen Ländervertreter in diesen Gremien nicht selten um Grössenordnungen voneinander abweichen [4]. Der Autor selbst verlässt sich seit vielen Jahren erfolgreich auf die nachstehend wiedergegebenen Empfehlungen (Tabelle IV). Diese Werte sind jedoch nur für offene Leistungstransformatoren mit gasdicht vom Transformatorentank abgetrenntem Stufenschaltersystem anwendbar. Andere Konstruktionen verlangen individuelle Betrachtung, was eine zuverlässige Diagnosestellung nicht gerade vereinfacht.

Da die Gaskonzentration in einem kleinen Transformator zehnmal schneller ansteigt als in einem zehnmal grösseren Transformator, der den gleichen Fehler aufweist, ist es sinnvoller, nicht die Gaskonzentrationen, sondern die Gasbildungsraten zu normieren. Das wird heute vielfach bereits angewendet. Aus den in vielen Jahren bei ABB gesammelten Messdaten haben sich für die normale Gasproduktion in fehlerfreien Transformatoren die in Tabelle V aufgeführten Werte ergeben.

Gas	Rate [cm^3/Tag]
Wasserstoff H_2	< 5
Methan CH_4	< 2
Äthan C_2H_6	< 2
Äthylen C_2H_4	< 2
Acetylen C_2H_2	< 0,5
Kohlenmonoxid CO	< 50
Kohlendioxid CO_2	< 200

Tabelle V Normale Gasproduktion in Leistungstransformatoren

Für Messtransformatoren (Wandler) gelten wegen der gegenüber Transformatoren unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Verhältnis Öl : Papier, geringere Kupferverluste usw.) andere Werte. Aus den von der Arbeitsgruppe Cigré WG 15-01 TF 01 gesammelten Daten aus Wandlern in aller Welt haben sich für «gesunde» Apparate mit einer statistischen Sicherheit von 90% die Erfahrungswerte gemäss Tabelle VI herauskristallisiert. Die für die verschiedenen Abschlusssysteme unterschiedlichen Wasserstoffgehalte resultieren daraus, dass das sehr kleine Wasserstoffmolekül durch die Gummimembran diffundieren und somit leicht entweichen kann, was bei metallischen Abschlüssen normalerweise nicht möglich ist. Dies verdeutlicht einmal mehr, wie wichtig die Berücksichtigung solcher konstruktiver Details für die Beurteilung der erhaltenen Analysenresultate ist.

Weitere derartige Betrachtungen wie auch Empfehlungen für besondere Transformatorentypen, Durchführungen und ölgefüllte Kabel sind in der überarbeiteten Fassung des bereits erwähnten IEC-Dokumentes 599, an dem der Autor mitarbeitet, vorgesehen.

Die flüssigchromatographische Untersuchung des Isolieröls

In den Tabellen IV–VI sind stets auch die Gehalte an Kohlenmonoxid und Kohlendioxid enthalten, obwohl diese Gase für die Feststellung der Fehlerart (Teilentladungen, heisse Stellen usw.) nicht gebraucht werden. Da für die Bildung so grosser Mengen Kohlenoxide durch eine Öloxidation im Transformator der Sauerstoff fehlt, liegt es nahe, aus den Konzentrationen dieser beiden Gase Rückschlüsse auf eine Zersetzung der festen, aus Zellulo-

Gas	Menge [ppm = µL/L]
Wasserstoff H_2	300[a] 20[b]
Methan CH_4	30
Äthan C_2H_6	25
Äthylen C_2H_4	4
Acetylen C_2H_2	2
Kohlenmonoxid CO	330
Kohlendioxid CO_2	900

Tabelle VI Typische «Normalgasgehalte» in Wandlern

nach Cigré WG 15-01 TF 01, 90-%-Vertrauensbereiche
a Wandler mit Metallabschluss
b Wandler mit Gummiabschluss

se bestehenden Isolation zu ziehen. Versuche in dieser Richtung sind auch mit wechselndem Erfolg unternommen worden, klare Aussagen wurden jedoch dabei nie erzielt. Will man also eine Auskunft über den Zustand der Feststoffisolation gewinnen, müssen andere Indikatoren herangezogen werden.

Insbesondere Furan und seine Derivate erweisen sich dabei als geeignete Substanzen, den Nachweis eines Celluloseabbaus anzuzeigen (Bild 4), denn diese Verbindungen können durch eine reine Oxidation des Öles praktisch nicht gebildet werden. Langjährige Studien der Cigré WG 15-01, zusammen mit dem TC 10 der IEC, führten zum IEC-Standard 1198, welcher die analytischen Aspekte dieses Problemkreises regelt. Zum technischen Ablauf einer derartigen Analyse sei hier nur soviel erwähnt, dass eine kleine Ölmenge (etwa 2–10 g) ausreicht, um die darin gelösten Furane (= Papierabbauprodukte) zu extrahieren und mittels der HPLC(*H*igh *p*erformance *l*iquid *c*hromatography)-Messtechnik nachzuweisen (Bild 5). Im Isolieröl vorhandene Verbindungen wie Furfurol und 5(Hydroxymethyl)-furan-2-carbaldehyd und ähnlichen stehen in einem direkten Zusammenhang mit der mechanischen und damit indirekt auch der dielektrischen Festigkeit der Celluloseisolation. Eine ausführlichere Behandlung dieses Problemkreises ist in [2] zu finden.

Die HPLC-Analyse ist keine routinemässig anzuwendende Untersuchungsmethode wie die dielektrisch-chemische oder die gasanalytische Untersuchung des Transformatorenöls. Sie sollte aber angewendet werden, wenn wegen extrem hoher Kohlenoxidgehalte und/oder eines CO_2/CO-Verhältnisses von < 3 oder > 12 der Verdacht besteht, dass es im Transformator Heissstellen gibt, in denen die Celluloseisolation involviert sein könnte. In einem solchen Fall ist es immer wichtig, die zu ergreifenden Massnahmen zwischen Betreiber und Hersteller des Transformators sowie dem mit der Überwachung betrauten analytischen Labor zu besprechen.

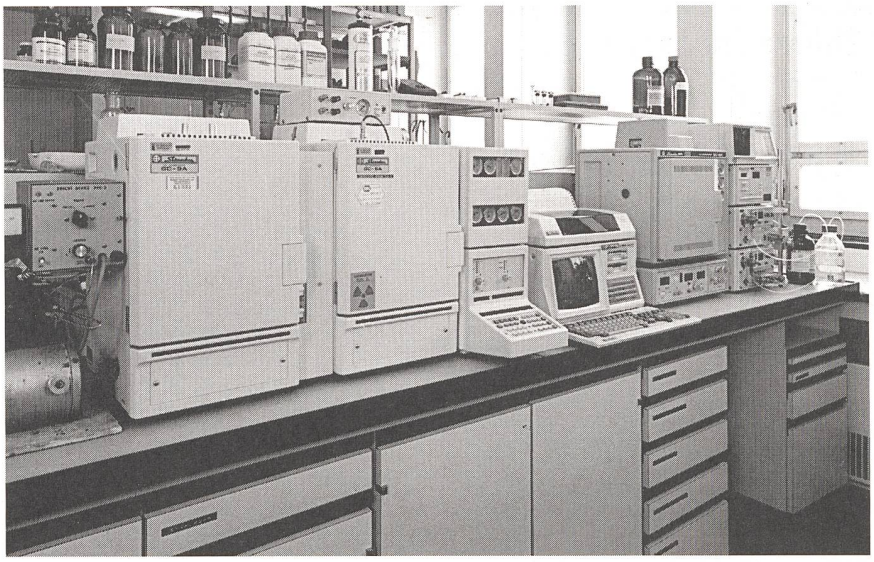


Bild 5 Instrumentierung für chromatographische Isolierölanalysen
Das Bild zeigt eine zweckmässige Instrumentierung, bestehend aus drei Gaschromatographen und einem HPLC-Gerät.

Kontrollperioden

Neben rein technischen Belangen sind es vor allem auch wirtschaftliche Beweggründe, die die Kontrollhäufigkeiten beeinflussen: die vorstehend beschriebenen Ölkontrollen kosten Geld. Daher werden die Kontrollintervalle immer ein Kompromiss zwischen technischer Wünschbarkeit und betriebswirtschaftlichen Überlegungen sein müssen. In den vielen Jahren der Überwachung ölisolierter elektrischer Geräte hat sich folgende Kontrollpraxis gut bewährt:

Transformatoren: Kontrollen sind bei Leistungstransformatoren angezeigt

- nach Abschluss der Montagearbeiten, vor der Inbetriebnahme:
  - dielektrische Kurzanalyse, das heisst Durchschlagsfestigkeit, tg δ bei 90 °C, eventuell Wassergehalt (in der Regel durch den Hersteller)
- drei bis sechs Monate nach Inbetriebnahme:
  - Basismessung für alle Transformatoren; Prüfprogramm gemäss Tabelle II sowie, falls das Öl inhibiert ist, Bestimmung des Inhibitorgehaltes.
  - bei Transformatoren > 100 kV, zusätzlich Gas-in-Öl-Analyse zur Feststellung des Ausgangszustandes (Fingerprint)
- ein Jahr nach der Basismessung:
  - Wiederholung der vorstehenden Untersuchungen
- weitere Kontrollintervalle:
  - Wiederholung der vorstehenden Untersuchungen bei Transformatoren mit einer Betriebsspannung von < 100 kV alle 8 Jahre, von 100 bis 200 kV alle 5–6 Jahre und von > 200 kV alle 4 Jahre.

Strategisch wichtige Objekte werden häufiger kontrolliert werden müssen. So hat es sich bestens bewährt, die Maschinentransformatoren der Kernkraftwerke im Vorfeld der jährlichen Kraftwerksrevisionen zumindest einer Gas-in-Öl-Untersuchung zu unterziehen, um bei Verdacht auf

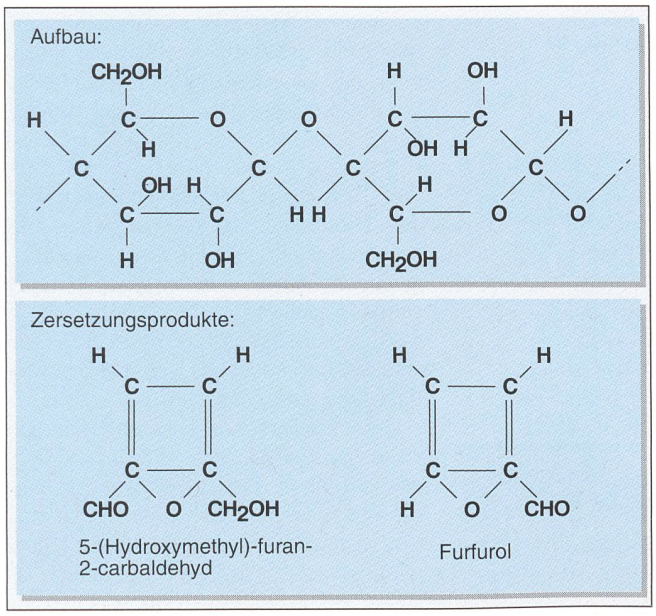


Bild 4 Aufbau und Zersetzungsprodukte von Cellulose
Insbesondere Furan und seine Derivate erweisen sich als geeignete Substanzen, den Nachweis eines Celluloseabbaus anzuzeigen.

Zitierte Normen

IEC-156 (1995)	Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method
IEC-247 (1978)	Measurement of relative permitivity, dielectric dissipation factor and d.c. resistivity of insulating oils
IEC-296 (1982)	Specification for unused mineral insulating oils for transformers and switchgear
IEC-422 (1989)	Supervision and maintenance guide for mineral insulating oils in electrical equipment
IEC-567 (1992)	Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases
IEC-599 (1978)	Interpretation of the analysis of gases in transformers and other oil-filled electrical equipment in service
IEC-1198 (1993)	Mineral insulating oils – Methods for the determination of 2-furfural and related compounds
DIN-51527 Teil 1 (1987)	Bestimmung polychlorierter Biphenyle (PCB)
DIN-57370/VDE-0370 Teil 1 (1978)	Isolieröle – Neue Isolieröle für Transformatoren, Wandler und Schaltgeräte

einen «schleichenden» Fehler Abhilfemassnahmen planen zu können. Eine erste solche Massnahme wäre in jedem Fall ebenfalls eine Verkürzung der Kontrollintervalle, um bei einer Eskalation der Gasproduktion eingreifen zu können, bevor der Transformator mit schwerem Schaden während des Betriebes ausfällt.

Wandler: In Anbetracht der im Vergleich zu den Transformatoren deutlich grösseren Anzahl der sich in Betrieb befindlichen Wandler wäre eine derart hohe Kontrollfrequenz weder aus technischen noch aus wirtschaftlichen Gründen angemessen. Während bei den unter Spannung stehenden Leistungstransformatoren eine fachgerechte Entnahme von Ölproben ohne weiteres möglich ist, müssen Wandler für den gleichen Zweck abgeschaltet sein, wodurch der Betrieb empfindlich gestört wird. Ausserdem ist wegen des wesentlich kleineren Ölvolumens die entnommene Ölmenge durch neues Öl zu ersetzen, was bei unsachgemässer Handhabung (Eindringen von Luftblasen) den Wandler eher in Gefahr bringt. Da Wandler andererseits in relativ grossen Serien hergestellt und auch von den Betreibern entsprechend eingesetzt werden, genügt es, pro Produktionsserie drei bis sechs Geräte auszuwählen und diese dann quasi als Prototyp für die gesamte Serie einem Überwachungszyklus zu unterwerfen [3]. Das Kontrollprogramm sollte dann zweckmässigerweise folgende Untersuchungen umfassen:

- dielektrisch-chemische Kurzanalyse gemäss Tabelle II
- Zersetzungsgasanalyse
- HPLC-Analyse zum Nachweis von Furanen.

Nach IEC-Recommendation No. 422 sollten diese Untersuchungen vor der Inbetriebnahme, nach einem Jahr und anschliessend in Intervallen von etwa sechs Jahren durchgeführt werden.

Zum Problemthema PCB

Ab den dreissiger Jahren wurden neben den Mineralölen auch *p*olychlorierte *B*iphenyle (PCB) in der Elektrotechnik eingesetzt, die wegen ihrer hohen chemischen Stabilität und Feuerresistenz in grossen Mengen hergestellt und als Weichmacher in Anstrichmitteln, als Hydraulikflüssigkeiten in Bergwerken sowie als Wärmeübertragungsflüssigkeiten grossen Absatz fanden. War es einerseits ihre hohe relative Dielektrizitätszahl, die sie für den Einsatz in Kondensatoren prädestinierte, so war es andererseits ihre Feuerresistenz, die diese Flüssigkeiten als Isoliermedium in Transformatoren interessant machte. Letzteres gilt insbesondere für Transformatoren, die dort aufgestellt werden sollten, wo ein elektrischer Durchschlag durch Aufreissen des Transformatorenkessels und Entzündung des Öles zu einer Brandkatastrophe führen könnte, durch die viele Menschen in Gefahr gebracht würden. So waren es dann die grossen Geschäftshäuser, Spitäler, Theater usw., bei denen mit PCB (Handelsnamen: Aroclor, Pyralène, Clophen, Askarel usw.) gefüllte Transformatoren zu finden sind.

PCB-Gehalt [ppm]	Massnahme
> 3000	Entsorgung innert 1 Jahr ab Kontrolle
100–3000	Reinigung oder Entsorgung innerhalb 2 Jahren ab Kontrolle
20–100	fachgerechter Ölwechsel mit Entsorgung bis 31.8.1998
< 20	keine (= «PCB-frei»)

Tabelle VII Entsorgungsfrist für Transformatoren und übrige ölgefüllte Elektrogeräte sowie Reserveöle

Aus Bestimmung «Entsorgung von PCB-haltigen und PCB-verdächtigen Geräten» des kantonalen Laboratoriums Aargau.

Nachdem erkannt wurde, dass polychlorierte Biphenyle beim Erhitzen unter Sauerstoffzutritt neben anderen Stoffen gesundheitsschädliche bis sehr giftige chlorierte Dioxine und Dibenzufurane (in der Öffentlichkeit bekannt als «Seveso-Gift») bildet, muss man feststellen, dass PCB-gefüllte Transformatoren ein Janusgesicht haben. Einerseits verringern sie Brandgefahr im Falle eines elektrischen Durchschlags, weil PCBs selbst nicht brennen. Andererseits stellen sie im Falle eines anderweitig entstandenen Brandes eine Gefahr dar, weil sie unter den Bedingungen eines normalen Brandes in unmittelbarer Umgebung giftige Dämpfe entwickeln können, was bei den Lichtbogentemperaturen eines elektrischen Durchschlags nicht der Fall ist. Letzteres wurde bei der EPRI (Electrical Power Research Institution) beim misslungenen Versuch nachgewiesen, mittels elektrischer Entladungen in PCBs Standard-Dioxinlösungen herzustellen, welche in Ringversuchen zur Ermittlung des Dioxingehaltes in PCBs verwendet werden sollten.

Wie auch immer – nachdem Ersatzlösungen für PCBs gefunden worden sind, dürfen diese Flüssigkeiten nicht mehr verwendet werden und mit der Inkraftsetzung der «Verordnung über umweltgefährdende Stoffe» vom 9. Juni 1986 nicht einmal mehr als Verunreinigung in Transformatorenölen enthalten sein. Nach dieser Verordnung gelten Geräte, deren Isolierflüssigkeiten mehr als 50 ppm (= mg/kg) halogenierte aromatische Stoffe wie PCB und andere enthalten, als «schadstoffhaltig» und müssen entsprechend gekennzeichnet werden. Ausserdem haben die Inhaber dafür zu sorgen, dass solche Geräte bis zum 31. August 1998 ausser Betrieb genommen werden. Die Ausführungskontrolle wurde den Kantonen übertragen. Für den Kanton Aargau gelten zum Beispiel die Bestimmungen gemäss Tabelle VII.

Als Nachweisverfahren für PCB in Ölen sind zwei grundsätzlich verschiedene Methoden bekannt:

- Der *Schnelltest,* eine einfache und kostengünstige Methode, die eine Ja/Nein-Antwort liefert. Dieser Test ist zwar ohne grossen Aufwand durchzuführen, hat aber den Nachteil, dass auch das Chlor erfasst wird, welches nicht vom PCB stammt. Da Chlor praktisch allgegenwärtig ist, ist die

La surveillance des transformateurs en service

Analyses de l'huile isolante en tant que moyen indispensable pour le diagnostic

L'huile minérale, outre ses remarquables propriétés diélectriques et réfrigérantes permet de scruter la «vie intérieure» du transformateur, en la soumettant à des contrôles adaptés et périodiques de son état physique et chimique. Spécialement les produits de décomposition et de dégradation dissous dans l'huile, tant ceux issus de l'huile elle-même que de l'isolant solide donnent d'importantes informations relatives à la présence de possibles points faibles à l'intérieur de la partie active, bien longtemps avant que se manifestent de gros dommages indirects qui peuvent conduire à la destruction totale du transformateur. Outre les contrôles chimico-diélectriques classiques de la qualité de l'huile, ceux utilisant la chromatographie gazeuse et liquide jouent dans ce contexte un rôle déterminant. L'article donne une vue détaillée des méthodes utilisées aujourd'hui et des expériences faites dans le diagnostic du transformateur sur la base des analyses de l'huile.

Gefahr gross, schnell einmal über den für schadstofffreie Stoffe geltenden Grenzwert zu kommen.

• Die *quantitative gaschromatographische Bestimmung,* bei der 0,5 bis 2 g des Probeöles flüssigchromatographisch von störenden Begleitstoffen befreit und anschliessend gaschromatographisch auf den PCB-Gehalt untersucht wird. Bei der weit verbreiteten DIN-Methode (DIN-51527, Teil 1) werden sechs bekannte, identifizierte Spezies von insgesamt 209 verschiedenen PCB-Varianten als Leitsubstanz bestimmt und durch Multiplikation mit einem Umrechnungsfaktor der Gesamtgehalt berechnet. Eine neue, wesentlich genauere aber auch aufwendigere Methode ist zurzeit in einer speziellen IEC-Arbeitsgruppe in Arbeit. Wichtig ist jedenfalls, dass man sich vor der Durchführung einer derartigen Untersuchung mit dem Auftraggeber oder den zuständigen Behördenvertretern über die anzuwendende Bestimmungsmethode einigt.

Fazit

Sowohl die periodischen dielektrisch-chemischen Prüfungen als auch die chromatographischen Untersuchungen (Gas-in-Öl und HPLC) von Isolieröl stellen eine unentbehrliche Massnahme dar, die Überwachung sowie einen weitgehend störungsfreien Betrieb von Transformatoren, Wandlern und anderen ölisolierten elektrischen Geräten zu gewährleisten und sollten daher von keinem Betreiber solcher Anlagen ausser acht gelassen werden.

Verdankung

Der Autor richtet seinen Dank an Johannes Schober, der wesentlich zum Gelingen dieses Artikels beigetragen hat.

Literatur

[1] *E. Dörnenburg* und *O. Hutzel:* Betriebsüberwachung durch Untersuchungen des Isolieröls. etz-a 98(1977)3, S. 211–215.

[2] *H.-J. Knab:* Die Anwendung der Hochdruckflüssigkeitschromatographie (HPLC) zur Betriebsüberwachung von Transformatoren. VGB Kraftwerkstechnik 71(1991)6, S. 594–597.

[3] *H.-J. Knab* et al.: Diagnostic Tools for Transformers in Service. Cigré Symposium Berlin 1993, 110-05.

[4] *Th. Praehauser* et al.: Reliability, Surveillance and Maintenance of High Voltage Insulation in Power Systems. Cigré Symposium Montreal 1991, 6-04.

NOTSTROM-ANLAGEN

AKSA bietet ein umfassendes Programm an Notstrom-Anlagen:
Stationäre und mobile benzin-, gas- und dieselbetriebene Aggregate
im Leistungsbereich von 1kW bis 1'300 kW.
Notstrom-Anlagen können Sie bei uns auch *mieten.*
Verlangen Sie unverbindlich eine Beratung und detaillierte Unterlagen.

Übrigens: Wir planen und realisieren auch *Blockheiz-Kraftwerke.*

Eine AKSA-Spezialität:
Revisionen und Sanierungen
von älteren Notstrom-Anlagen.

Certified Quality System SQS ISO 9001 Reg.-Nr. 12002-01

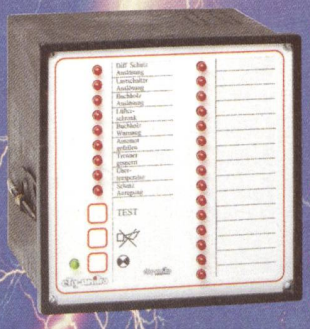
AKSA WÜRENLOS AG

NOTSTROMANLAGEN • GENERATOREN • TRANSPORT-KÜHLANLAGEN • TEL 056/424 13 13 • FAX 056/424 13 30 • 5436 WÜRENLOS

Fleischmann
unitro
STÖRMELDESYSTEME

Netzausfälle vermeiden!

Durch schnelles und sicheres Erfassen von Gefahr- und Störzuständen, mit unseren neuen Störmeldesystemen.



- Elektronisches Fallklappenrelais
- Kompakt-Meldesystem (72) 144x144x150 mm
- 8, 16 bzw. 24 Melde-Eingänge
- max. 230 V AC / 220 V DC
- Auflösung ≤ 1 msec.
- potentialfreie Ausgänge
- wahlweise Busanbindung
- Höchste EMV-Werte: VDEW-Störfestigkeitswerte für digitale Stationsleittechnik, EN-Konformität

S+K
Schärer + Kunz AG
Hermetschloostr. 73
Postfach 757
CH-8010 Zürich
Tel. 01-434 80 81
Fax 01-434 80 90

Kat 5 / Klasse D

Kabeltester 160MHz, 14 Sekunden

schneller
LAN Kabelmessung von 0.1MHz bis 160MHz in 14 Sekunden (beidseitig gemessen)

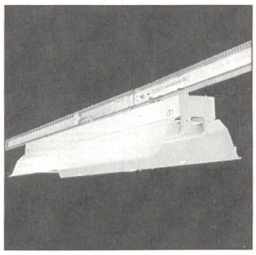
sicherer
Messung bis 160MHz und Qualifizierung der Kabel für bis zu 20 Netzwerke

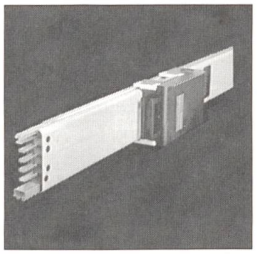
genauer
Übertrifft in Genauigkeit die Level 2-Anforderungen für alle Linkarten (Eichprotokoll wird mitgeliefert)

Option:
FiberSmart Probe misst Fiberleitungen im 850nm und 1300nm Bereich in dB, dBm, mW, dazu Länge und Signalverzögerung.

Prüfen Sie den WireScope 155 bevor Sie einen Kat.5 Kabeltester kaufen. Seine Sicherheit, Genauigkeit und Geschwindigkeit sind unerreicht!

MPC PERCOM AG
Ein Unternehmen der: TELION
Rütistrasse 26, 8952 Schlieren
Postfach, 8010 Zürich
Tel. 01 - 732 16 63
Fax 01 - 732 16 66





LANZ Canalisations électriques d'éclairage et de distribution 20–800 A

Pour installations simples et avantageuses de lampes, d'appareils et machines dans des locaux de fabrication, chaînes de production, stations d'essai, laboratoires, garages, entrepôts et halles d'expédition, installations sportives, supermarchés etc.

- Pose simple. Matériel d'installation, boîtiers de connexion et de distribution livrés simultanément
- Extension, transformation, agrandissements possibles en tout temps et rapidement
- Avantageuses – modernes – réutilisables

Conseil, offre, livraison rapide et avantageuse par
lanz oensingen 062/388 21 21 fax 062/388 24 24

Veuillez me faire parvenir la documentation suivante:

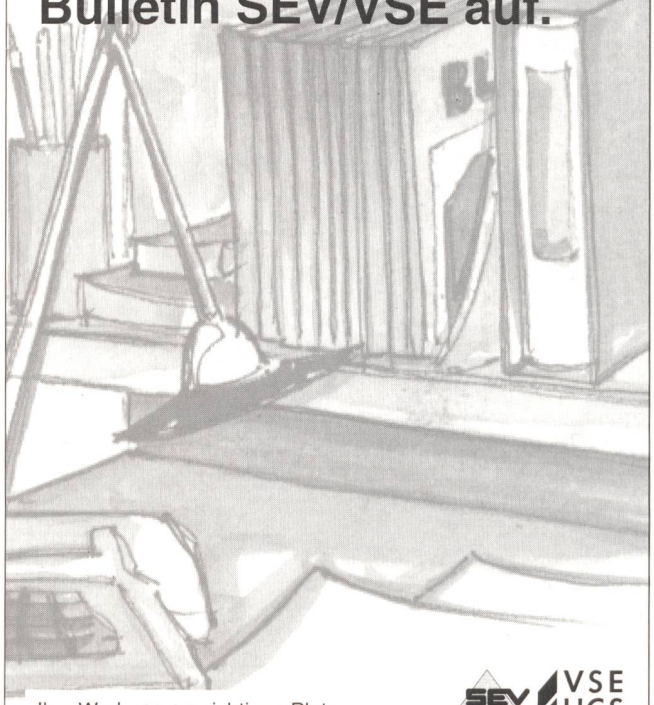
- ☐ Canalisations électriques d'éclairage et de distribution 20–800 A
- ☐ Canalisations électriques LANZ BETOBAR 380–6000 A
- ☐ Système de support de câbles
- ☐ Canaux G à grille
- ☐ Canaux d'allèges
- ☐ Système de montage MULTIFIX
- ☐ Pourriez-vous me/nous rendre visite, avec préavis s.v.p.?

Nom/adresse: _____

20f

lanz oensingen sa
CH-4702 Oensingen · téléphone 062 388 21 21

40% der Leser bewahren alle Ausgaben des Bulletin SEV/VSE auf.



Ihre Werbung am richtigen Platz.
Wir beraten Sie gerne. **Tel. 01/207 86 34**

SEV ASE VSE UCS