

## Messtechnische Ueberwachung von Transformatoren unter besonderer Berücksichtigung von "on site"-Messungen

### 1. Einleitung

Abgesehen von gelockerten Verbindungen infolge betriebsbedingter Vibrationen und den daraus resultierenden heissen Stellen oder Teilentladungen sind es in erster Linie elektrische und chemische, am Isolationssystem angreifende Prozesse, die die Lebensdauer eines Transformators begrenzen.

Durch rechtzeitig ergriffene Korrekturmassnahmen können ungeplante Ausfälle verhindert und die Gebrauchsdauer der Geräte wesentlich erhöht werden. Regelmässige Kontrollen in Verbindung mit fachmännischer Interpretation der Ergebnisse sind der Schlüssel dazu. Entscheidungshilfen werden in der IEC Publikation Nr. 422 "Supervision and Maintenance Guide for Mineral Insulating Oil in Electrical Equipment" gegeben.

### 2. Grundvoraussetzungen für einen zuverlässigen Trafobetrieb

Die wesentlichen Voraussetzungen für einen zuverlässigen Transformatorbetrieb sind:

- ausreichende elektrische Festigkeit des frei zirkulierenden Isolieröls
- geringe dielektrische Verluste in der Festisolation
- Entladungsfreiheit
- Abwesenheit heisser Stellen

Mechanische, elektrische, thermische und chemische Prozesse führen zu Veränderungen des Isolationssystems, die als "Alterung" bekannt sind und sich durch die am Oel messbaren Eigenschaften:

- Durchschlagsspannung
- Wassergehalt
- Verlustfaktor
- Gehalt an Oxidationsprodukten und
- Gasgehalt

charakterisieren lassen

### 3. Messmethoden zur Betriebsüberwachung ölgefüllter Transformatoren

#### 3.1 Durchschlagfestigkeit

Die elektrische Festigkeit des Isolieröls wird praktisch ausschliesslich von der physikalischen Reinheit des Oels beeinflusst. Diese kann sich unter den Bedingungen des Betriebes verändern durch

- Ölfremde Verschmutzung (z.B. von schlecht ausgehärtetem Innenanstrich des Kessels herrührend)
- Ölunlösliche Alterungsprodukte (Schlamm) des Isolieröls
- hohen Wassergehalt
- von der Festisolation abgegebene Zellulosefasern

Die Bestimmung der Durchschlagfestigkeit wird also eine der wichtigsten Prüfungen zur Kontrolle des Zustandes des Isolationssystems sein. Sie erfolgt im wesentlichen nach dem in IEC-Publikation Nr. 156 beschriebe-

nen Verfahren bei einer Schlagweite von 2,5 mm zwischen Kugelkalotten. Als gemessene Durchschlagsfestigkeit wird das arithmetische Mittel aus sechs Einzelbestimmungen angegeben.

Da sich die Verteilung des im Oel gelösten Wassers und der festen Verunreinigungen während Transport und Vorbereitung zur Messung ändern, ist es vorteilhaft, die Durchschlagsfestigkeit an Ort und Stelle zu prüfen, wie es in der neuen Fassung der IEC-Publikation Nr. 422 vorgeschlagen ist. Wir werden sehen, dass man auch dann noch nicht den tatsächlichen Zustand des Oeles im Transformator erfasst, aber man kommt ihm doch schon recht nahe.

Der Wassergehalt spielt dabei eine besondere Rolle. Bis zu einer relativen Feuchtigkeit von etwa 80...90%, bei der das Wasser physikalisch gelöst ist, ist in einem partikelfreien Oel die Durchschlagsfestigkeit vom Wassergehalt nahezu unabhängig. Erst wenn die relative Oelfeuchtigkeit gegen 100% geht, fällt sie rapide ab (Fig.1).

Ganz anders sieht es aber aus, wenn wasseradsorbierende Partikel, z.B. Zellulosefasern im Oel dispergiert sind. Diese laden sich, entsprechend der relativen Feuchtigkeit des Oels ebenfalls bis zu dieser relativen Feuchtigkeit mit Wasser auf, was zur Erhöhung sowohl der Leitfähigkeit als auch der relativen Dielektrizitätszahl und damit dazu führt, dass die Fasern verstärkt ins elektrische Feld gezogen werden und dort einen Durchschlag auslösen können (Fig.2).

Das unterschiedliche Verhalten von Zellulosefasern in absolut trockenem sowie in feuchtem Oel ist aus den Fotosequenzen Fig. 3 und Fig. 4 ersichtlich.

### 3.2 Wassergehalt

Obwohl, wie wir gesehen haben, der Wassergehalt des Oels eine der wichtigsten, die elektrische Festigkeit des Oels beeinflussenden Grössen ist, ist der Informationswert einer quantitativen Bestimmung, wie sie normalerweise im Labor durchgeführt wird, nicht sehr hoch einzuschätzen. Dazu müssen die Gesetzmässigkeiten der Feuchtigkeitsverteilung zwischen Festisolation und Oel richtig verstanden werden.

Dazu zuerst ein paar Bemerkungen zum Begriff der "Löslichkeit"

Die Konzentration "c" des Wassers im Oel ist nach dem Henry-Dalton'schen Gesetz dem Partialdruck "p" des Wasserdampfes über dem Oel proportional:

$$p = k \cdot c$$

Löst man diese Gleichung nach

$$k = p/c$$

auf, so erkennt man, dass der Koeffizient "k" angibt, wie sich die Konzentration des Wasser im Oel mit dem Wasserdampf-Partialdruck über dem Oel ändert. Je höher also der Dampfdruck über der Lösung ist, desto mehr

Wasser wird gelöst. "k" ist also ein Mass für die Löslichkeit des Wassers im Oel und nimmt mit steigender Temperatur ab. Wenn, wie z.B. in IEC-Publikation 422 gesagt wird, dass die Löslichkeit des Wassers im Oel mit steigender Temperatur zunimmt, dann liegt das an einer falschen Interpretation der in Fig. 1 der Publikation gezeigten Sättigungskurve (Fig.5). Diese gilt nur für den Fall, dass Oel und freies Wasser bei gleicher Temperatur nebeneinander vorliegen, weil der temperaturbedingte Anstieg des Wasserdampfdrucks den Abfall der "Löslichkeit" überkompensiert. Wir kommen weiter unten noch einmal darauf zurück.

Welche Information bringt uns nun die Bestimmung des Wassergehalts im Oel?

Fig. 6 gibt die Wassergehalte von Isolierpapier bei verschiedenen Temperaturen wieder, wenn es mit Isolieröl verschiedener Feuchtigkeit im Gleichgewicht steht. Betrachten wir Kurve 1 und nehmen wir an, die Temperatur des Isolationssystems betrage 40°C. Im Gleichgewichtszustand entspricht dies einem Wassergehalt im Papier von ca. 4,5%. Um bei einer Temperaturerhöhung von 10°C wieder mit einem Oel ins Gleichgewicht zu kommen, das 20 ppm Wasser enthält, müsste der Wassergehalt des Papiers von ca. 4,5 auf ca. 3,5% absinken. Nimmt man nun an, das Massenverhältnis von Papier zu Oel betrage 1 : 10 dann entspricht dies einer auf das Oel bezogenen Wassermenge von 1000 ppm. Gelöst werden können aber gmäss Fig. 5 bei 50°C nur 150 ppm. Da das Oel keine Möglichkeit hat, das vom Papier abgegebene Wasser an die Aussenwelt abzugeben, wird sich also der Feuchtigkeitsgehalt des Oel auf einen der Feuchtigkeit des Papiers entsprechenden Wert erhöhen. Mit anderen Worten: schon bei relativ geringer Temperaturerhöhung wird von der Festisolation soviel Wasser freigesetzt, dass der sich im Gleichgewichtszustand einstellende Wassergehalt im Oel theoretisch Werte annehmen kann, wie sie kaum je gemessen wurden. Umgekehrt kann aber die Festisolation bei langsamer Abkühlung des Transformators wesentlich mehr Wasser aufnehmen, als im Oel überhaupt gelöst ist, ohne selbst wesentlich feuchter zu werden.

Aus diesen Ueberlegungen lässt sich nun ableiten:

- a. Der Nutzen einer Wasserbestimmung im Oel eines im Betrieb stehenden Transformators ist, gemessen am zu treibenden Aufwand, minim; die Bestimmung ist vollends nutzlos, wenn nicht mindestens die Oeltemperatur zum Zeitpunkt der Probenahme registriert wird.
- b. Da das Oel am Kesselboden, also an der bevorzugten Probenahmestelle, bereits den Oelkühler passiert hat, ist anzunehmen, dass sich bei ursprünglich hohen Wassergehalten ein Teil des gelösten Wassers bereits wieder abgeschieden hat und sich damit der Bestimmung entzieht.
- c. Berücksichtigt man nun noch die Feuchtigkeitsgleichgewichte zwischen Oel und Zellulose in Abhängigkeit von der Temperatur (Fig.6), dann wird schnell klar, dass es keiner grossen Feuchtigkeit in der Festisolation bedarf, um im Oel nach Abschaltung des Transformators und schneller Abkühlung auf Umgebungstemperatur Uebersättigung hervorzurufen .

- d. Eine Sichtprüfung der in betriebswarmem Zustand und möglichst weit oben genommenen und in einem verschlossenen Gefäß abgekühlten Oelprobe sollte demnach ausreichen, um den Zustand der Festisolation hinsichtlich ihres Feuchtigkeitsgehaltes abschätzen zu können
- e. Eine Trocknung des Oel mittels Zentrifuge und erst noch nach Abkühlung, wie dies in IEC-Publikation 422 vorgeschlagen wird, ist barer Unsinn, da sich nach Abkühlung praktisch das gesamte Wasserinventar in der Festisolation befindet, es sei denn, man heizte den Transformator auf und liesse dann schnell das noch heisse Oel ab und danach abkühlen. Davon steht aber in der erwähnten Empfehlung nichts geschrieben.

### 3.3 Die Bestimmung der dielektrischen Verluste und des Durchgangswiderstandes

Einrichtungen und Vorgehen zur Bestimmung der dielektrischen Verluste von Isolierölen sind in den IEC-Publikationen Nr.250 und 247 beschrieben. Die dazu notwendige Einhaltung der Reinigungsvorschriften der Messzellen sowie des vorgeschriebenen Programms zur Aufheizung und Temperierung der Oelproben ist bei Messungen an der Anlage kaum zu gewährleisten.

Da bei einer Messfrequenz von  $50 \text{ min}^{-1}$  der Dipolterm vernachlässigbar ist, gilt die lineare Beziehung

$$\tan \delta = \frac{3.6 \cdot 10^{10}}{\zeta \cdot \epsilon_r}$$

$\zeta$  - der spezifische Durchgangswiderstand des Oels  
 $\epsilon_r$  - die relative Dielektrizitätszahl (ca. 2.1-2.3)

die, im unteren Bereich allerdings mit relativ grosser Streuung, auch einigermaßen befolgt wird (Fig. 7). Als Ersatzlösung bietet sich somit die Messung des Durchgangswiderstandes an, die einfacher durchzuführen ist und hinreichend genaue Ergebnisse liefert, um mit gutem Erfolg z.B. zur Ueberwachung der Oel-Regenerierung eingesetzt zu werden. Micafil bietet zu diesem Zweck das Widerstands-Messgerät VZ 220 an, das aus der auf  $90^\circ\text{C}$  temperierbaren Messzelle und einem speziellen Hochohm-Meter besteht und in der Regel fester Bestandteil der Regenerieranlage für Isolieröl ist.

### 3.4 Die Bestimmung des Alterungszustandes

Abgesehen von den dielektrischen Verlusten, die ja - mindestens zum Teil - alterungsbedingt sind, dienen zur Charakterisierung des chemischen Zustandes eines Isolieröls im allgemeinen die klassischen Kennwerte

- Aussehen und Farbe z.B. n. IEC-Publikation Nr. 296
- Neutralisationszahl n. IEC Publikation 296
- Grenzflächenspannung gegen Wasser n. IEC Publikation 296A
- Schlammgehalt n IEC Publikation Nr. 422
- und allenfalls noch die Verseifungszahl n VDE

Einfach zu handhabende Feldmethoden zur Bestimmung dieser Kennwerte gibt es jedoch nicht. Diese Messungen müssen also im Labor durchgeführt werden.

Schneller, umfassender und auf die Dauer billiger ist dann aber die Bestimmung der Oxidationsprodukte im Oel mittels der IR-Spektroskopie. Sie beruht auf der Absorption der IR-Strahlung in für den untersuchten Stoff charakteristischen Wellenlängenbereichen.

Der aus der Probe austretende Strahl wird von einem Monochromator in Strahlen diskreter Wellenlängen zerlegt (Fig. 8), deren Intensitäten detektiert und mit den Intensitäten der entsprechenden spektralen Bereiche der ungestörten IR-Strahlung verglichen werden. Die Differenz wird als Absorption in Prozenten über dem abgefahrenen Wellenlängenbereich in Form eines IR-Spektrogramms aufgezeichnet.

In mineralischem Isolieröl, das mit C-C-; C-H- und den Schwingungen der "konjugierten" Doppelbindungen der aromatischen Kerne ein relativ einfaches, für jedes Produkt charakteristisches Spektrum aufweist, lassen sich Oxidationsprodukte durch das Auftreten zusätzlicher Schwingungen im Wellenzahlbereich zwischen 1710 und 1775  $\text{cm}^{-1}$  leicht nachweisen (Fig. 9).

Die Intensität der bei Wellenzahl 3600  $\text{cm}^{-1}$  auftretenden Bande dient der quantitativen Bestimmung phenolischer Inhibitoren nach IEC-Publikation Nr. 666, und eine quantitative Auswertung der bei Wellenzahl 1600  $\text{cm}^{-1}$  zu findenden, für aromatische Verbindungen typischen Absorptionsbande kann als Identifikationsmerkmal für das zu untersuchende Oel herangezogen werden (Fig. 10).

Mit diesen vielseitigen Möglichkeiten hat sich das IR-Spektrometer schon lange in jedem gut eingerichteten Labor einen festen Platz erobert. Das IR-Spektrogramm zusammen mit dem Ergebnis einer Bestimmung der dielektrischen Verluste sollten heute für eine grobe Uebersicht über den Alterungszustand des Oels ausreichen.

### 3.5 Die Bestimmung elektrischer oder thermischer Fehler

Eine der wichtigsten Massnahmen zur Werterhaltung grosser Leistungstransformatoren oder Wandler und zur Erhaltung der Betriebssicherheit eines ganzen Netzes ist die frühzeitige Erfassung elektrischer oder thermischer Fehler in einem Stadium, in dem eine wesentliche Schädigung des Isolationssystems noch nicht eingetreten ist und Massnahmen zur Wiederertüchtigung geplant werden können.

Sicherstes Hilfsmittel zur Früherkennung solcher Schäden in unter Spannung stehenden Transformatoren ist heute noch immer die gasanalytische Bestimmung der für die verschiedenen Fehlerarten typischen, im Oel gelösten Zersetzungsgase. Zu diesem Zweck muss dem zu überwachenden Gerät eine Oelprobe so entnommen werden, dass zwischen Probenahme und Entgasung des Oels kein Austausch mit der Atmosphäre stattfinden kann.

Der Oelprobe wird also das gelöste Gas entzogen und ein Teil des so gewonnenen Gasgemischs mittels eines Trägergases durch eine geeignete

"Chromatographie-Kollonne" transportiert. Die Komponenten weisen in der Kollonne unterschiedliche Wanderungsgeschwindigkeiten auf sodass sie, sauber voneinander getrennt, die Kollonne zu verschiedenen Zeiten verlassen. Sie passieren einen geeigneten Detektor, der den Durchgang einer Gaskomponente durch ein der Gaskonzentration proportionales elektrisches Signal bekannt gibt. Diese Signale werden über der Zeit registriert und ergeben so ein "Gaschromatogramm". Die "Retentionszeiten" (s. Fig. 11) sind für die betreffende Gaskomponente charakteristisch und dienen daher zu ihrer Identifizierung. Die Fläche der erhaltenen Peaks auf dem Chromatogramm ist ein Mass für die Konzentration. Die Auswertung erfolgt heute meistens auf elektronischem Wege mittels eines Integrators.

Die Probenahme, Durchführung der Untersuchung und Auswertung der Ergebnisse sind in den IEC-Publikationen Nr. 567 und Nr. 599 ausführlich beschrieben.

Der Nachweis thermischer oder elektrischer Fehler beruht auf der Tatsache, dass je nach der thermischen Belastung des Oels charakteristische Molekülbruchstücke auftreten und zwar dergestalt, dass bei rein thermischen Fehlern (schlechte Kontakte ohne Funkenentladungen; Eisenbrand) neben wenig Wasserstoff hauptsächlich Methan und die höheren Homologen der gesättigten Kohlenwasserstoffe sowie einige leichte Kohlenwasserstoffe mit Doppelbindungen auftreten (Ethen; Proben etc). Bei höheren örtlichen Energiedichten (Teilentladungen, bei denen Funken auftreten, steigt neben viel Wasserstoff der Anteil an ungesättigten Verbindungen bis hin zum Acetylen, das schliesslich hohe Konzentrationen erreichen kann, wenn schwere Lichtbogenentladung vorgelegen hat (siehe Tabelle Fig. 12).

Einen Sonderfall stellt die "stille" Entladung in gasgefüllten Räumen (z.B. bei schlechter Imprägnierung) dar, bei der hauptsächlich Wasserstoff, jedoch kaum ungesättigte Verbindungen auftreten.

Einige Möglichkeiten zur Auswertung der Analysenresultate sind in IEC-Publikation Nr. 599 zusammengestellt. Es gibt andere, die leistungsfähiger sein sollen. Ein "Schema-F"-Verfahren, bei dessen Anwendung sich alle Arten von Fehler (auch sich überlagernde) identifiziert werden können, gibt es aller bisheriger Erfahrung nach nicht. Darum sollte man die Auswertung der gasanalytischen Resultate in jedem Fall einem erfahrenen Fachmann überlassen.

Die Durchführung der Untersuchung, speziell die Entgasung der Oelprobe erforderte bisher einen apparativen Aufwand, der auch die Gasanalyse bisher für eine Feldmessung ungeeignet erscheinen liess.

In Fig. 132 ist eine tragbare Entgasungseinheit abgebildet, die sich - zusammen mit dem ebenfalls tragbaren Gaschromatographen - ausgezeichnet für Feldmessungen eignet, um auf diese Weise eine Vorselektion zu ermöglichen, um nur solche Oele einer exakten und damit auch teuren Laboruntersuchung zuzuführen, bei denen die Feldmessung für "gesunde" Transformatoren unübliche Gaskonzentrationen angezeigt hat.

Geräte zur Probenahme, Magnetrührwerk und Schlauchpumpe zur Entgasung der Oelprobe sowie eine kleiner Schreiber sind fest installiert in einem Koffer untergebracht, der auch alle Anschlüsse zu dem ebenfalls tragbaren Gaschromatographen enthält. Die mit dieser Einrichtung erhältlichen Gaschromatogramme sind ausreichend genau, um schon elektrische oder thermische Fehler erkennen zu können, lange bevor ein Ansprechen des Buchholz-Relais oder ein bleibender, zu grösseren Reparaturen nötiger Fehler zu befürchten ist.

### 3.6 Messtechnische Ueberwachung der Oelaufbereitung oder Regenerierung

"On site" durchzuführende Interventionen zur Werterhaltung von Transformatoren bieten sich in folgenden Fällen an:

- Die Ergebnisse gasanalytischer Untersuchungen zeigen Imprägnierfehler an  
Massnahme ---> Neuimprägnierung
- Die Durchschlagsfestigkeit ist bei noch befriedigendem chemischen Zustand des Oels stark abgesunken.  
Massnahme ---> Trocknung des Oels und der Festisolation im Umlaufverfahren.
- Der Verlustfaktor des Oels ist infolge Oelalterung stark angestiegen  
Massnahme ---> Regenerierung des Isolationssystems im Umlaufverfahren

In allen drei Fällen ist die Kontrolle des Gas- und des Wassergehalts für den Erfolg der Massnahme essentiell. Im dritten Fall kommt noch die Kontrolle des die elektrischen Eigenschaften beeinflussenden chemischen Zustandes hinzu.

#### 3.6.1 Oelkontrolle bei einer Neuimprägnierung

Der Erfolg einer Neuimprägnierung der Festisolation zur "Ausheilung" von Imprägnierfehlern hängt weitestgehend mit vom Grad der Entgasung des Oels bei der Wiederimprägnierung ab. Dies deshalb, weil eine ölfeuchte Festisolation ohne die Möglichkeiten einer Ofenbehandlung kaum soweit entgast werden kann, dass das Imprägnieröl alle Bereiche der Festisolation homogen durchdringt. Kleine Gaseinschlüsse werden zunächst immer zurückbleiben und müssen vom Oel aufgenommen werden. Das ist jedoch nur möglich, solange der Partialdruck des im Oel gelösten Gases kleiner ist als der Gasdruck innerhalb der Gasblase. Je weitgehender das Imprägnieröl entgast ist, desto schneller werden solche Restgase aufgenommen, und desto schneller steht der Transformator für den weiteren Betrieb wieder zur Verfügung.

Mit dem Gasgehalts-Messgerät VZ-215 bietet die Firma Micafil ein universell einsetzbares Gerät an, mit dem sich problemlos Gasgehalte zwischen 0.1 und 12 % mit hinreichender Genauigkeit ermitteln lassen (Fig. 14). Die Messung erfolgt diskontinuierlich, indem man ein bestimmtes Volumen des zu untersuchenden Oels über eine Filterplatte in die vorevakuierte Messkammer einfließen lässt und den sich einstellenden Gleichgewichtsdruck mittels Aneroidmanometer misst.

Für die kontinuierliche Ueberwachung von Entgasungsprozessen ist das für den Einbau in eine Oelaufbereitungsanlage konzipierte Gasgehalts-Messgerät VZ-210 (Fig.15) vorgesehen.

Die Einrichtung besteht aus einer Entgasungszelle (Fig. 13), die von einem kleinen Nebenstrom des Produktöls kontinuierlich durchflossen wird. Die Zelle ist so konstruiert, dass das Oel über eine grosse Oberfläche bei sehr kleinem freien Zellenvolumen über der Oeloberfläche abläuft, wodurch eine schnelle Einstellung des Gleichgewichtsdrucks über der Oberfläche bewirkt

wird. Die Messung des Drucks erfolgt mittels eines Pirani-Vakuummeters. Dass bei einem gemessenen Druck  $< 14$  mbar der Anteil des Wasserdampf-Partialdrucks am Gesamtdruck bis über 50% ansteigen kann, ist für diesen Fall ohne Belang (s.unten), da die Oelfeuchtigkeit in diesen Bereichen ohnehin vom Zustand der Festisolation bestimmt wird (s. 3.2).

### 3.6.2 Oelkontrolle bei Massnahmen zur Trocknung der Festisolation

Wie unter 3.2 ausgeführt wurde, wird die Oelfeuchtigkeit weitgehend von der Feuchtigkeit der Festisolation bestimmt, deren Adsorptionskapazität um Grössenordnungen grösser ist als das im Oel gelöste Wasserinventar. Eine einfache Trocknung des Oels bringt daher nichts, denn wenn hohe Oelfeuchte festgestellt wird, muss davon ausgegangen werden, dass die Festisolation ebenfalls feucht ist.

Eine Trocknung des Oels ist daher nur sinnvoll, wenn sie im Umlauf und so durchgeführt wird, dass das getrocknete und aufgeheizte, in den Transformator wieder eintretende Oel Zeit hat, sich ausreichend mit von der Festisolation abgegebener Feuchtigkeit aufzuladen. Das Oel dient also als Transportmittel für die Feuchtigkeit.

Unter Ausnutzung der Tatsache, dass bei niedrigem Begasungsdruck der Anteil des Wasserdampfpartialdrucks des im Oel gelösten Wassers etwa gleich gross wie der der gelösten Luft wird (vergl.Fig. 16), lässt sich zur Kontrolle des Trocknungsverlaufs mit Vorteil das oben erwähnte Gasgehaltsmessgerät VZ-210 einsetzen. Dazu muss nur sichergestellt sein, dass der Oelkreislauf gegen Lufteinbrüche ausreichend gesichert ist, damit der Anteil des Wasserdampf-Partialdrucks am gemessenen Gesamtdruck gross genug ist, um als Indikator für den Wassergehalt des in die Messzelle eintretenden Oels dienen zu können.

### 3.6.3 Oelkontrolle bei der Regenerierung

Die Oelregenerierung stellt die dritte Stufe einer "on site" durchführbaren Oelaufbereitung dar, bei der neben der Entgasung und Trocknung des Oels (wie auch der Festisolaton) noch eine adsorptive Entfernung polarer, die dielektrischen Eigenschaften des Oel beeinflussender Alterungsprodukte des Oels durchgeführt wird. Hinsichtlich der Ueberwachung des Wasser- und Gasgehaltes des Oels gilt das unter 3.6.1 und 3.6.3 Gesagte. Zur Ueberwachung des eigentlichen Regenerierprozesses dient das unter 3.5 kurz beschriebene Widerstandsmessgerät, das kontinuierlich im Nebenstrom betrieben werden kann. Es sollte jedoch erwähnt werden, dass auch nach Erreichen eines hohen elektrischen "Reinheitsgrades" noch beträchtliche Mengen an Oelalterungsprodukten im Regenerat vorhanden sein können, die sich auf die Alterungsstabilität des Oels ungünstig auswirken. Dem ist bei der Entscheidung zum Abbruch der Regenerierung nach Möglichkeit Rechnung zu tragen. Eine IR-Aufnahme des Regenerats kann dabei als Entscheidungshilfe dienen.

4. Quellen

IEC-Publikation Nr. 74

Method for assessing the oxidation stability of insulating oils

IEC-Publikation Nr. 156

Method for the determination of the electric strength of insulating oils

IEC-Publikation Nr. 247

Recommended test cells for measuring the resistivity of insulating liquids and methods of cleaning the cells

IEC-Publikation Nr. 250

Recommended methods for the determination of the permittivity and dielectric dissipation factor of electrical insulating materials at power, audio and radio frequencies including metre wavelengths

IEC-Publikation Nr. 296

Specification for new insulating oils for transformers and switchgear

IEC-Publikation Nr. 422

Maintenance and supervision guide for insulating oils in service

IEC-Publikation Nr. 599

Interpretation of the analysis of gases in transformers and other oil-filled electrical equipment in service

IEC-Publikation Nr. 567

Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases

IEC-Publikation Nr. 666

Detection and determination of specified anti-oxidant additives in insulating oils

IEC-Publikation Nr. 733

Determination of water in insulating oils, and in oil-impregnated paper and pressboard

IEC-Publikation Nr. 814

Determination of water in insulating liquids by automatic coulometric Karl Fischer titration

B. Gänger

Kontrolle der Isolierölalterung und Pflege des Oeles von Hochspannungs-transformatoren und Messwandlern

ETZ-A 84(1963)24, 800...3

J. Binggeli, J. Froidevaux, R. Kratzer

Le traitement des transformateurs - Critères de qualité et d'achèvement du processus

W. Erb und J. Schober

Empfehlungen zur Kontrolle von Transformatorenöl im Betrieb

Brown Boveri Mitteilungen Nr.8, 1972, S.422...6

J. Schober und W. Strittmatter

Ueber den Einfluss geringer Wassergehalte auf die Durchschlagsfestigkeit von Isolierflüssigkeiten

Bull. SEV 59(1968)1, 13...8

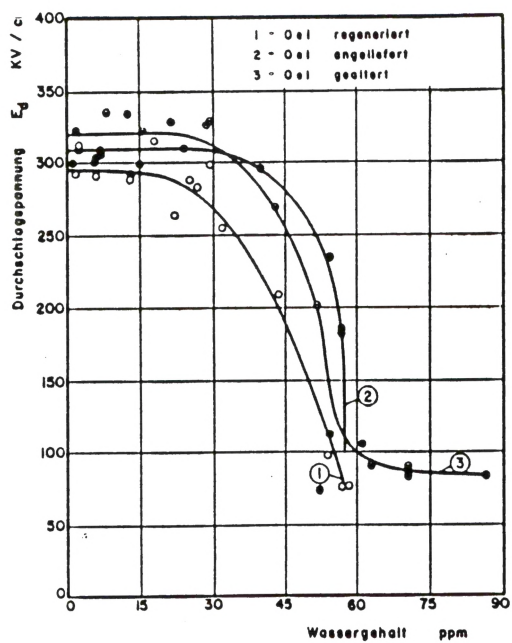


Fig. 1  
Einfluss des Wassergehaltes von reinem Isolieröl auf die Durchschlagsfestigkeit

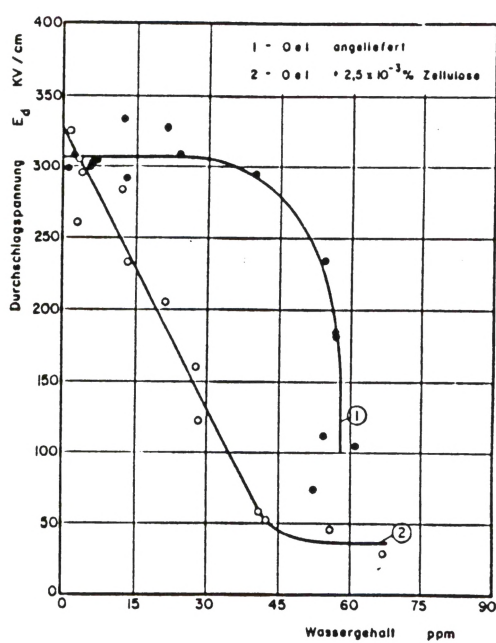


Fig. 2  
Einfluss des Wassergehaltes von faserhaltigem Isolieröl auf die Durchschlagsfestigkeit



Fig. 3  
Bildung von Faserbrücken im elektrischen Feld  
Dielektrikum: Isolieröl trocken

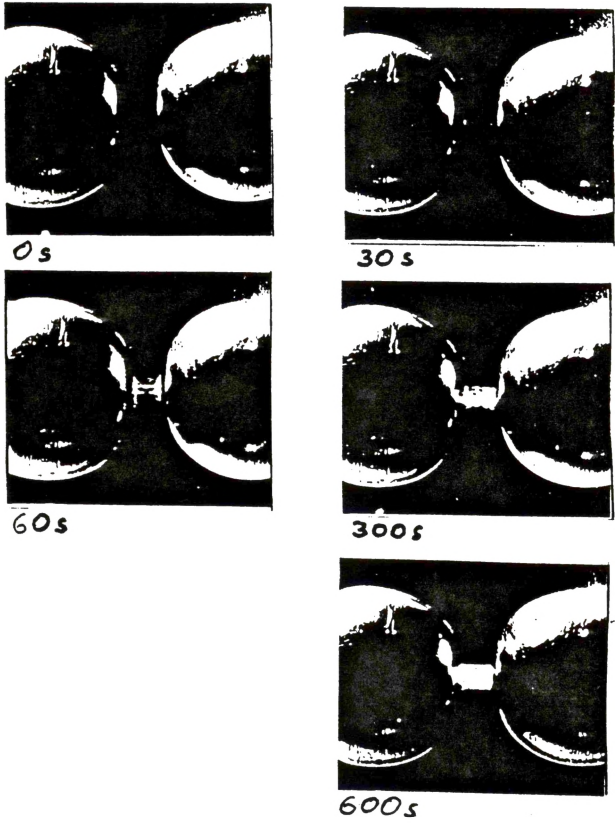


Fig. 4  
Bildung von Faserbrücken im elektrischen Feld  
Dielektrikum: Isolieröl feucht

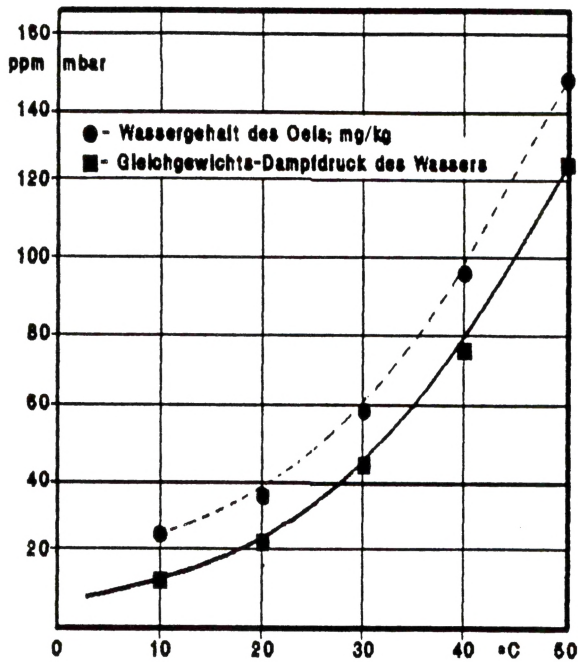


Fig. 5  
Sättigungskonzentration von Wasser  
in Isolieröl als Funktion der Tem-  
peratur

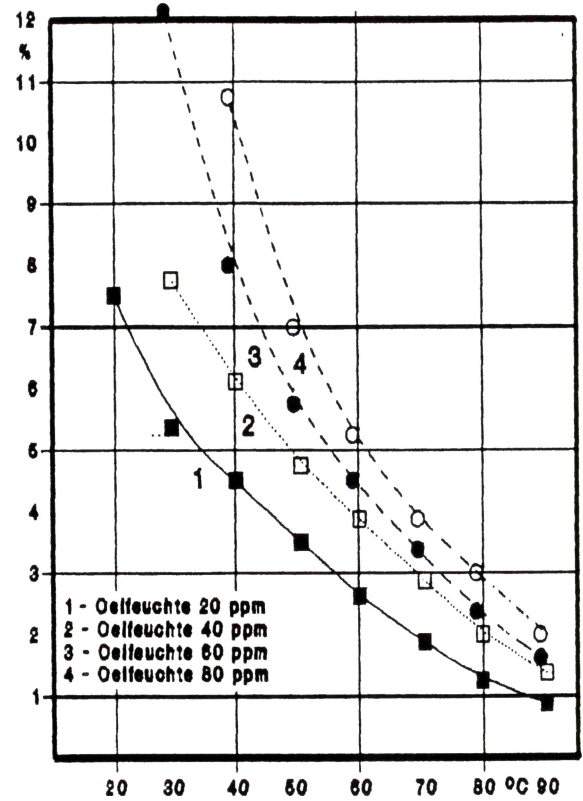


Fig. 6  
Abhängigkeit der Gleichgewichts-  
feuchtigkeit von Isolierpapier als  
Funktion der Temperatur  
Parameter: Wassergehalt des Oels

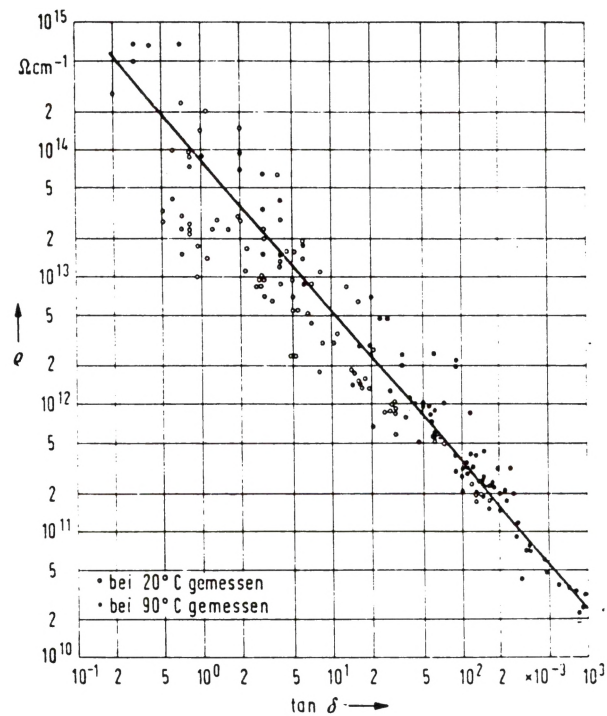


Fig. 7  
Zusammenhang zwischen spezifischem  
Durchgangswiderstand und tan  
gemessen bei 20 und bei 90°C.

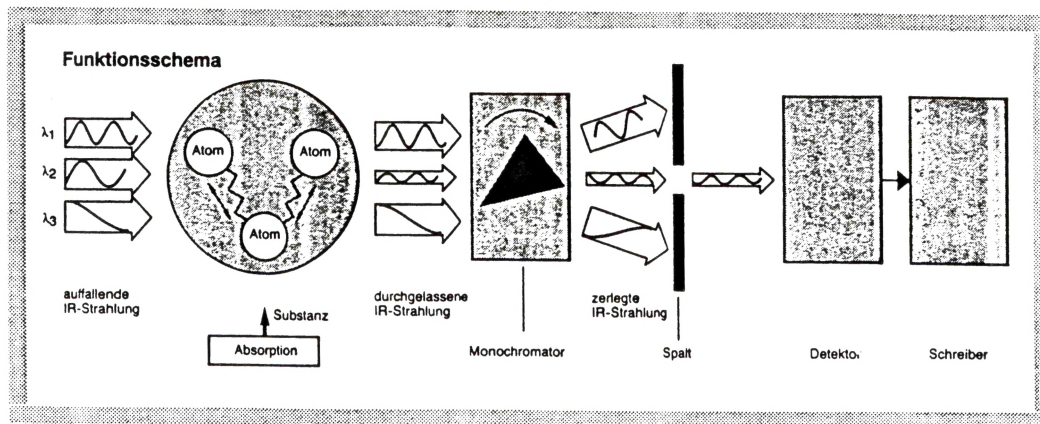


Fig. 8  
Funktionsprinzip eines  
IR-Spektrographen

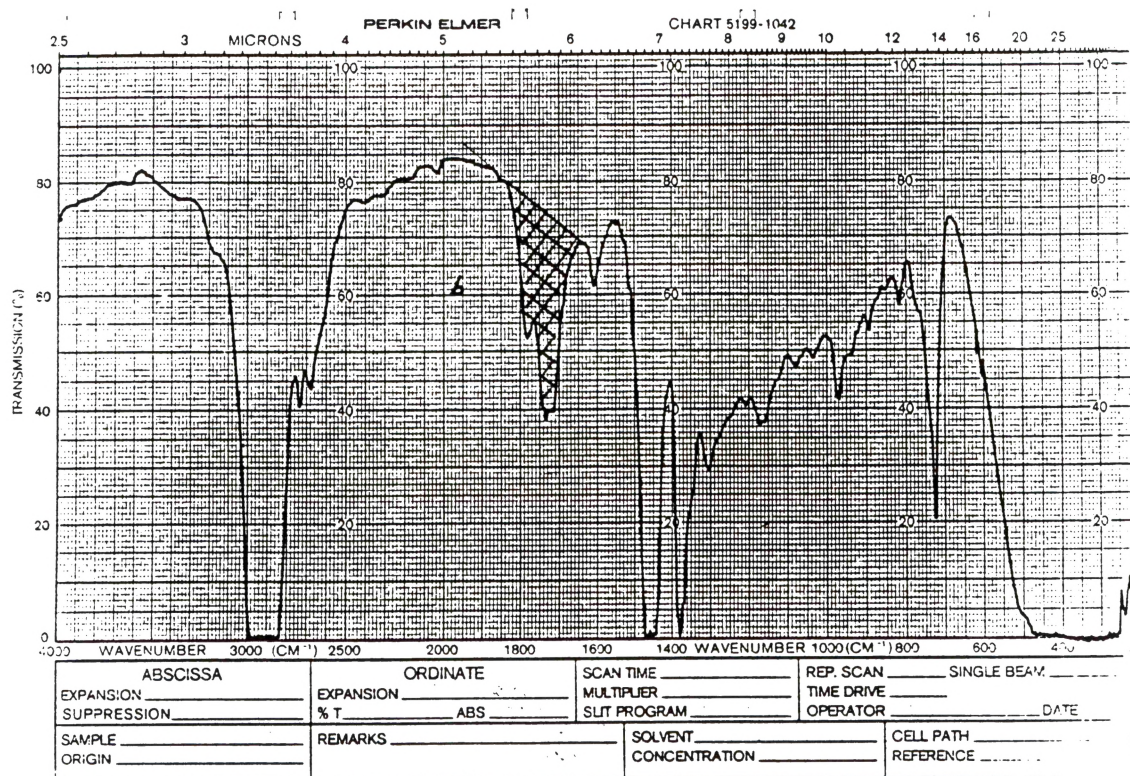


Fig. 9  
IR-Spektrum eines stark  
gealterten Isolieröls

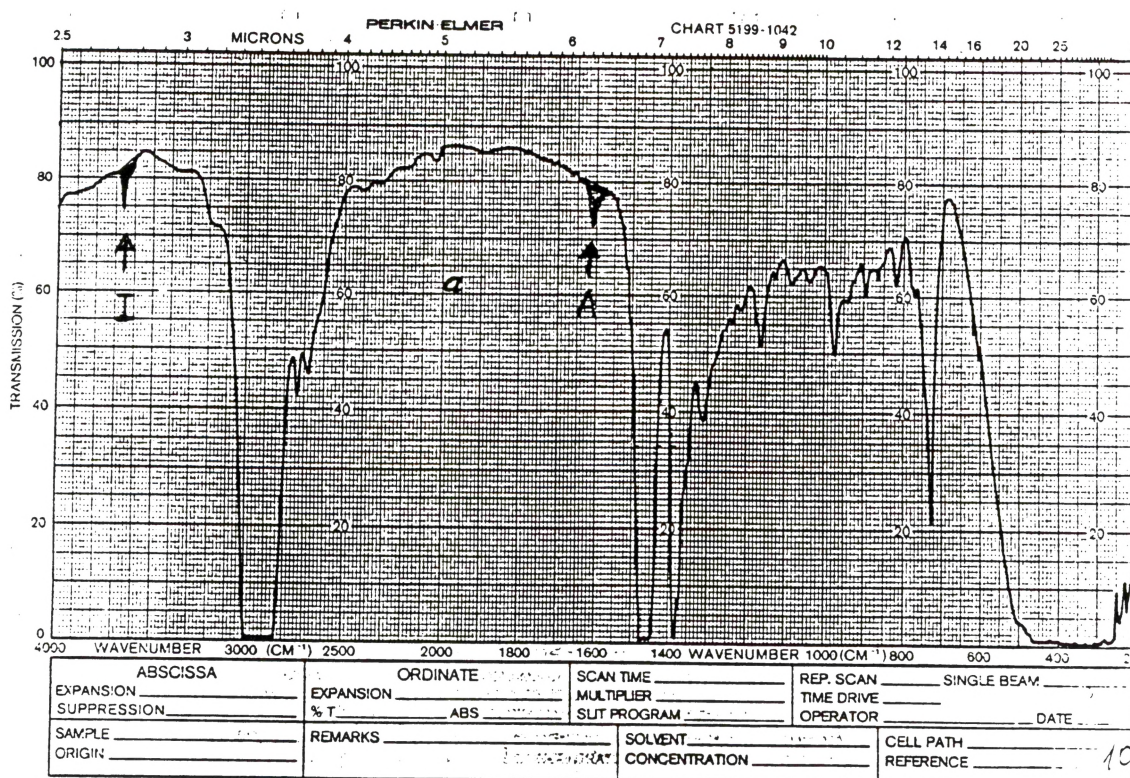


Fig. 10  
IR-Spektrum eines neuen,  
inhibierten Isolieröls

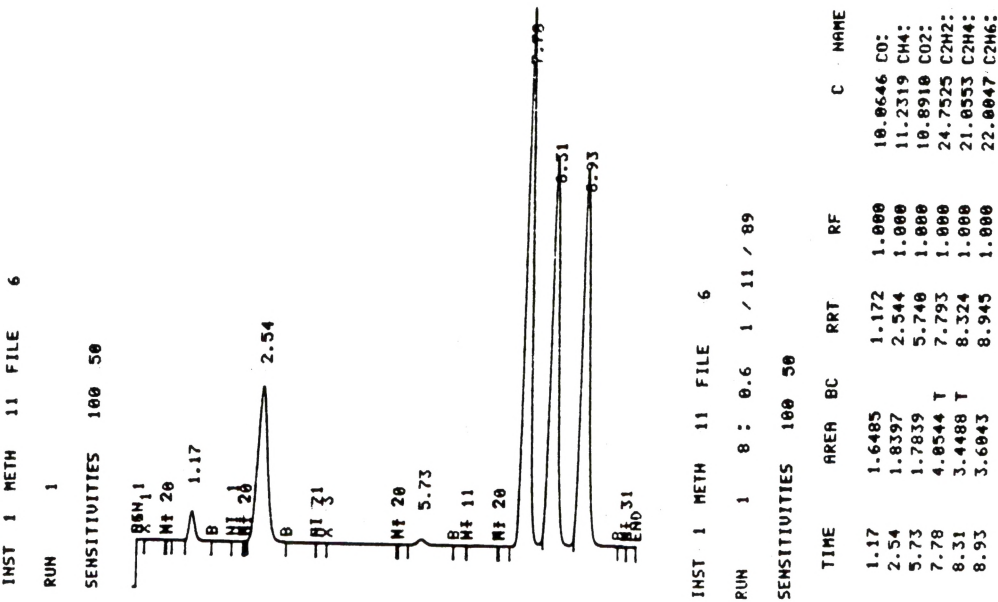


Fig 11  
Beispiel für ein Gaschromatogramm

| ART DES FEHLERS                    | GAS-ZUSAMMENSETZUNG * |                         |                                  |
|------------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------------|
|                                    | $\frac{CH_4}{H_2}$    | $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ | $\frac{C_2H_6}{C_2H_2 + C_2H_4}$ |
| Thermische Ueberbeanspruchung      | >1                    | <0.8                    | <1                               |
| Stromstarke Entladungen            | <1 doch >0.1          | >0.8                    | <1                               |
| "stille" Entladungen in Hohlräumen | <0.1                  | <0.8                    | >1                               |
| Teilentladungen mit Funkenbildung  | <0.1                  | >0.8                    | >1                               |

\*Verhältnisse der in ppm gemessenen Gaskonzentrationen

Fig. 12  
Für Entladungen und thermische Fehler typische Zusammensetzungen der Zersetzungsgase im Oel

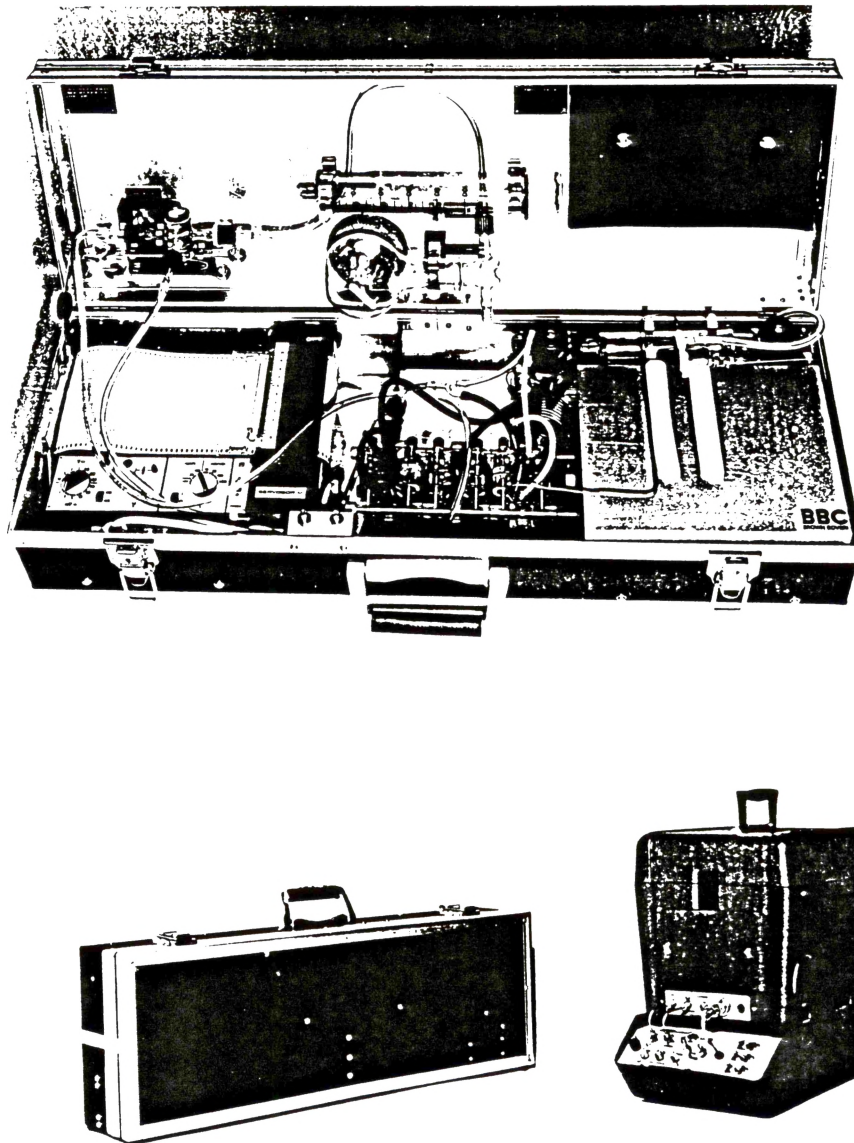


Fig. 13  
Transportable Aufbereitungs- und  
Messeinrichtung zur gaschromato-  
graphischen Bestimmung von Zerset-  
zungsgasen in Isolieröl

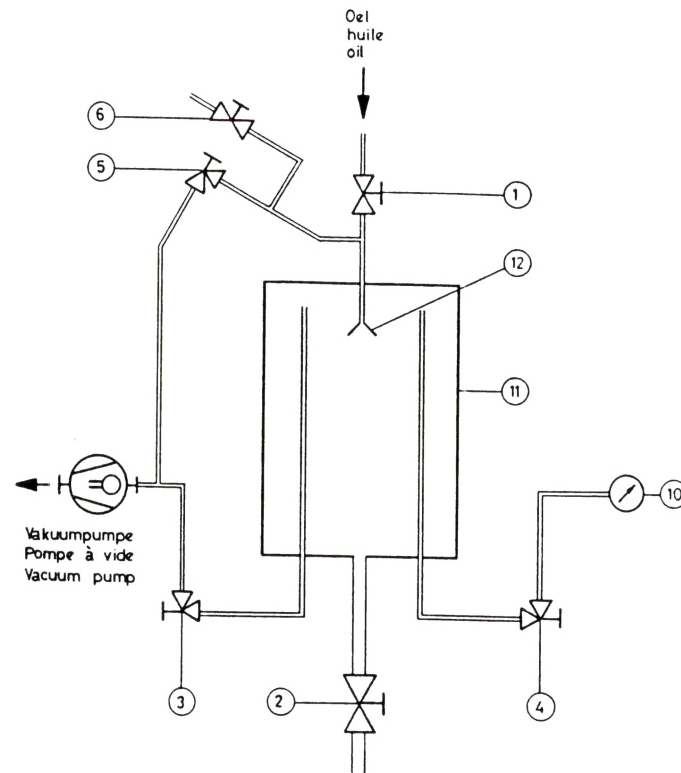


Fig. 14  
Funktionsschema des Gasgehalts-  
Messgeräts VZ 215 für Isolieröl

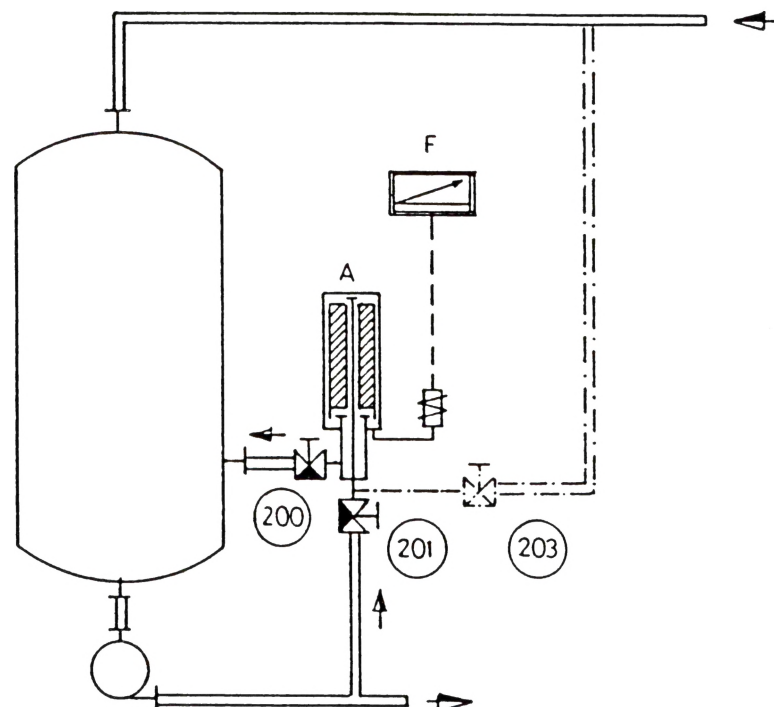


Fig. 15  
Funktionsschema des Gasgehalts-  
Messgeräts VZ 210 für Isolieröl

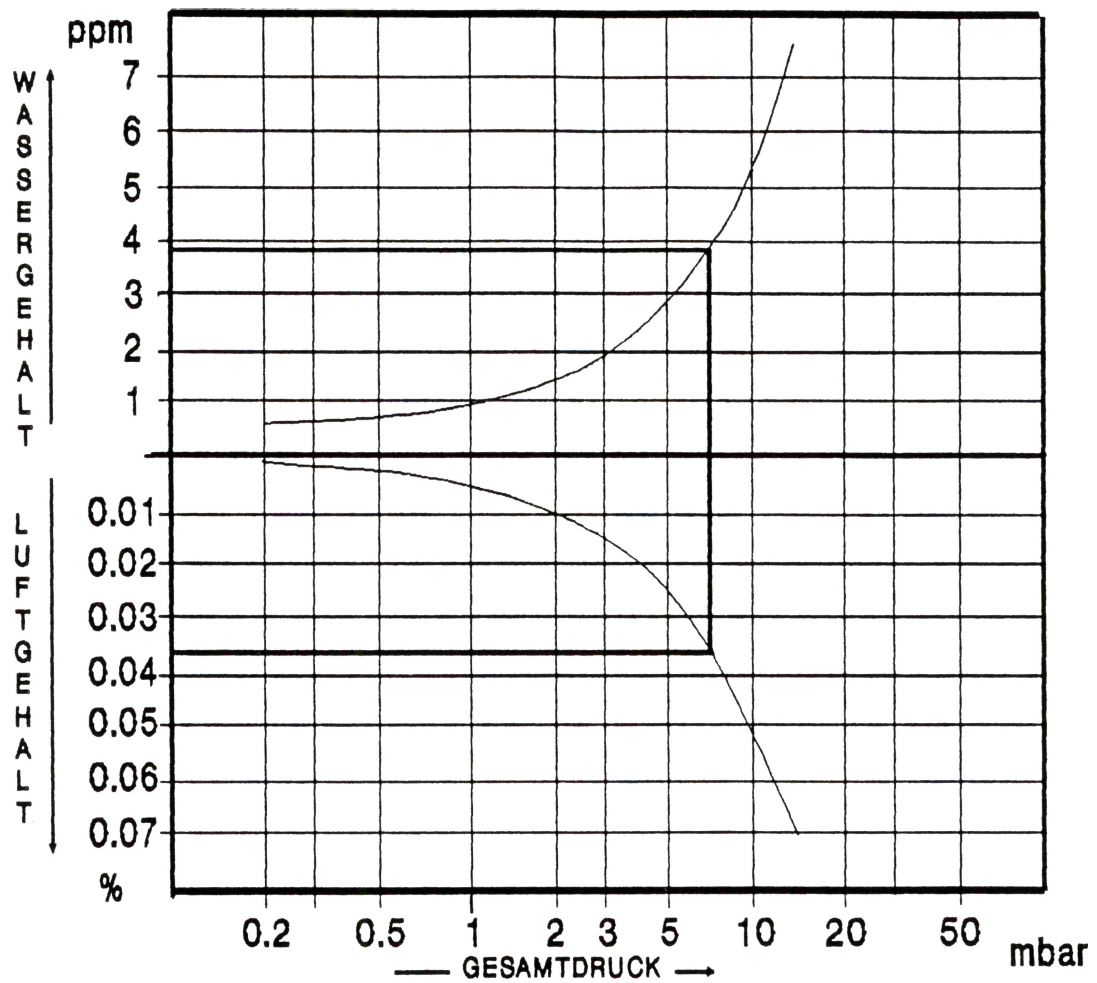


Fig. 16  
 Partialdruckverhältnisse von  
 Luft und Wasserdampf über  
 Isolieröl bei Gesamtdrucken  
 unter 14 mbar (Temperatur 60°C)