

AUFBEREITUNG VON NEUEN UND GEALTERTEN ISOLIERÖLEN

von P. Gmeiner

Einleitung

In den letzten Jahren sind Versuche mit gasisolierten Transformatoren und die Entwicklung von synthetischen Isolierstoffen stark forciert worden.

Trotzdem zeichnet sich zur Zeit keine Entwicklung ab, welche in absehbarer Zeit den Oel/Papier-Hochspannungs-Isolations-Komplex durch andere Isolationssysteme ersetzen könnte. Die Gründe dafür sind mannigfaltig und liegen hauptsächlich in den guten elektrischen, sowie zweckmässigen physikalischen Eigenschaften des Isolieröles.

Durch die seit Einsatz der Isolieröle (ab 1900) als Isoliermittel immer mehr gesteigerte, elektrische und thermische Belastung (früher ca. 1000 kg/MVA, heute ca. 80 - 90 kg/MVA) kommt einer optimalen Oelaufbereitung und Oelpflege erhöhte Bedeutung zu.

Um die hohen Anforderungen welche an das Isolieröl, sowie auch an die feste Isolation gestellt werden zu erfüllen, ist es zwingend, dass das Oel optimal aufbereitet, filtriert, und unter Vakuum abgefüllt (Imprägnierung) wird.

In den nachfolgenden Ausführungen wird einerseits auf die Beurteilungskriterien für Qualitätsmerkmale von Aufbereitungsanlagen hingewiesen und andererseits aufgezeigt, welche Oel-Kennwerte mit den verschiedenen Oelaufbereitungs- und Regenerieranlagen beeinflusst werden können.

Um das komplexe Gebiet der Oelaufbereitung besser zu beurteilen, werden einleitend einige technologische Grundlagen kurz in Erinnerung gerufen.

1. Isolieröl-Sorten

Es liegen von der chemischen Zusammensetzung her zwei Arten vor:

- Naphthenbasische Oele

hier überwiegt der Naphthenanteil (cyclische chemische Verbindungen) den Paraffinanteil.

Diese Oele weisen im Grundzustand einen recht hohen Aromatengehalt auf. Zur Zeit stellen diese Oele den Hauptteil, obwohl die geologischen Vorkommen kleiner sind als die der

- Paraffinbasischen Oele

hier überwiegt im Grundzustand der Paraffinanteil den Naphthenanteil (gesättigte aliphatische Kohlenwasserstoffe, kettenförmige chemische Verbindungen).

Infolge des erhöhten Paraffinanteils weisen diese Oele im Grundzustand einen relativ hohen Stockpunkt auf. Auch ist der Aromatengehalt kleiner als bei den naphthenbasischen Oelen. Durch geeignete chemische Verfahren können diese Oele so modifiziert werden, dass sie ähnliche physikalische und elektrische Eigenschaften erreichen wie die naphthenbasischen Oele. Je nach Art der eingebrachten Zusätze besteht die

Tendenz zu anderem "Schäumverhalten" bei der Vakuum-aufbereitung.

Bezüglich der Gasaufnahme oder Abgabe spricht man von

- Gasabsorbierendem (gasfestem) Oel

Diese Oele haben die Fähigkeit, die unter speziellen Prüfbedingungen (Teilentladungen) entstehenden Gase (Wasserstoff, etc.) teilweise chemisch zu absorbieren. Allgemein kann gesagt werden, dass aromatische Kohlenwasserstoffe die Gasabsorptionsfähigkeit tendenziell erhöhen (siehe Diagramm D1).

Aromatische Kohlenwasserstoffe mit hohem Dampfdruck weisen eine grössere Gasabsorptionsfähigkeit auf. Andererseits wird die Erkennung von Teilentladungen an elektrischen Apparaten erschwert, da der dabei entstehende Wasserstoff weitgehend im Oel absorbiert wird und demzufolge mit einer Gasanalyse anfänglich nicht nachgewiesen werden kann.

- Gasproduzierendes Oel

Bei diesen Oelen wird das unter den entsprechenden Prüfbedingungen (Teilentladung) entstehende Gas (Wasserstoff, etc.) nicht chemisch mit dem Oel verbunden, sondern im Oel gelöst. Demzufolge besteht bei diesen Oelen die Möglichkeit, durch Gasanalysen sofort allfällige Teilentladungen an elektrischen Apparaten zu erkennen.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass:

- gasabsorbierende Oele ebenfalls Wasserstoff produzieren falls sie Teilentladungen ausgesetzt sind.
- gasabsorbierende Oele bezüglich Teilentladung etwas stabiler sind als gasproduzierende Oele.
- die Gasabsorptionsfähigkeit von der Art der aromatischen Kohlenwasserstoffe im Oel abhängt.
- die Gasaufnahme-fähigkeit (Ostwald-Faktor) bei beiden Oelarten ähnlich ist.

2. Technologische Grundlagen

2.1 Viskosität

Niedrige Viskosität des Isolieröles ist aus Gründen des Wärmetransports und der Oelzirkulation im Transformator gefordert. Auch für die Aufbereitung wirkt sich tiefe Viskosität vorteilhaft aus. Demzufolge ist es empfehlenswert Isolieröle mit hohen Viskositäten (zum Beispiel Silikonöl) bei erhöhter Temperatur aufzubereiten.

2.2 Wasser- und Gas-(Luft) aufnahme in Isolierölen

ist in der einschlägigen Literatur eingehend beschrieben. Die Kriterien der Aufnahmefähigkeit sind in erster Linie mit dem sogenannten Ostwald-Faktor und dem Henry'schen Gesetz erläutert.

Zusammenfassend sei erwähnt, dass hauptsächlich folgende Faktoren die Wasser- und Luftaufnahme beeinflussen:

Art der Flüssigkeit (Öl). .

Art und Druck des überlagerten Gases.

Temperatur der Flüssigkeit, (Öl) beeinflusst sehr stark die Wasseraufnahme und in reduziertem Mass die Luftaufnahme.

Für den Bereich der Entgasungsstufe sind die entsprechenden Werte im Diagramm D2 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Wasseraufnahme bei steigender Öltemperatur sinkt (bei konstantem überlagertem Wasserdampfpartialdruck). Dies im Gegensatz zur möglichen Wasserlöslichkeit die mit steigender Temperatur ansteigt.

Die Luftaufnahme erhöht sich leicht mit steigender Temperatur.

2.3 Abhängigkeit der elektrischen Eigenschaften

Die Güte eines neuen Isolieröles wird hauptsächlich anhand

- der Durchschlagspannung
- des Isolationswiderstandes
- des elektrischen Verlustfaktors \tan
- stationärer Teilentladung im elektrischen Feld beurteilt.

2.3.1 Einfluss des Wassergehaltes

auf die vorgängig erwähnten Kennzahlen sind in der Literatur ausführlich beschrieben.

Die von verschiedenen Autoren untersuchte Abhängigkeit der Durchschlagspannung von Wassergehalten weist erhebliche Unterschiede auf (siehe Diagramm D3).

Eindeutig ist die Tatsache, dass die Durchschlagsspannung stark vom Vorhandensein von wasserabsorbierenden Verunreinigungen (z. B. Zelluloseteilchen) abhängt. Dies kann dadurch erklärt werden, dass sich zwischen Oel und Zellulose das Wasserdampf-Equilibrium einstellt (Faktor ca. 2000). Das heisst, bei Oel mit zum Beispiel 10 ppm Wassergehalt, hat die Zellulose eine Feuchte von ca. 2%. Demzufolge könnten die unterschiedlichen Durchschlagsspannungen der verschiedenen Autoren so erklärt werden, dass bei den einzelnen Messreihen, Unterschiede bezüglich Reinheitsgrad der verschiedenen Oelarten vorlagen.

2.3.2 Einfluss des Luftgehaltes

ist im Bereich gelöster Gase nicht feststellbar für

- \tan

- spezifischen Widerstand

auch ist der Einfluss auf die Teilentladungseinsatzfeldstärke sehr gering.

Die Durchschlagfeldstärke ist in geringem Mass von der Art des gelösten Gases abhängig, jedoch nicht von der Menge des gelösten Gases. Demzufolge wäre die Entfernung der im Oel gelösten Luft bezüglich Erhöhung der elektrischen Kenndaten nicht notwendig.

Die Frage, warum Luft (Sauerstoff) weitgehend aus dem Oel entfernt werden soll, kann zusammenfassend wie folgt erläutert werden:

- Luft im Oel beschleunigt die Oxydation, das heisst, die Alterung des Oeles.

- Bei Teilentladungen kann infolge des Sauerstoffes (Luft) im Oel, Wasser sowie Essigsäure entstehen.

Kleiner Luftgehalt im Oel

beschleunigt bei Füllung eines Transformators mit Oel die Absorption der restlichen Luft in der Isolation (siehe Diagramm D4). Dadurch wird in kürzerer Zeit die in den Isolationskapillaren oder Kanälen während der Oelfüllung durch die Oelsäule komprimierte Luft absorbiert, was eine Reduktion der Standzeit des Trafo's bis zur Spannungs- und Teilentladungsprüfung ergibt. Dies ist insbesondere bei dicken Isolationen wichtig, das heisst die Forderung von:

- Luftgehalten von ca. 0,1 - 0,15 Vol. % für Hochspannungstrafo's resp. 0,02 - 0,05 Vol. % für Wandler ist begründet.

2.3.3 Verunreinigungen im Oel

Sind hydrophile Verunreinigungen (Cellulosefasern) vorhanden, reduziert sich die Durchschlagspannung sehr stark (siehe Punkt 2.3.1 und Diagramm D3).

- Messungen bezüglich des Einflusses der Anzahl Verunreinigungen auf die Durchschlagspannung zeigen, dass ----- bei filtrierten Oelen mit nicht hydrophilen Verschmutzungspartikeln, erst eine relativ hohe Anzahl von Verschmutzungspartikeln eine klare Tendenz für die Aenderung der Durchschlagspannung ergibt (siehe Diagramme D5 und D6, Kurve 1).

- Durchschlagsspannungsversuche mit strömenden Oel (8) -----
zeigen einen erhöhten negativen Einfluss der Partikelzahl auf die Durchschlagsspannung (siehe Diagramm D6, Kurve 2) gegenüber Messungen mit ruhendem Oel.

3. Anforderungen an moderne

Hochleistungs-Oelaufbereitungsanlagen

können je nach Einsatzart (Oelaufbereitung während Transformator-Fabrikation oder im Felde) wie folgt zusammengefasst werden:

- Optimale erreichbare Aufbereitungswerte bezüglich Wasser- und Luftgehalt im ersten Durchgang
$$\left(W_{H_2O} < 3 \text{ ppm} \quad / \quad W_L < 0,1 \text{ Vol \%} \right)$$
- Optimaler Entgasungswirkungsgrad.
- Optimale Filtrierung während Oelaufbereitung sowie bei Filtrierbetrieb mit erhöhtem Oeldurchsatz.
- Transformator-Aufheizung mit erhöhter Oelumwälzmenge und entsprechender Heizleistung.
- Schonende thermische Behandlung des Oeles.
- Parallele Transformator-Evakuierung während Oelaufbereitung.
- Wärmerekuporation.
- Automatische Ueberwachung von:
 - Oelschaumniveau in Entgasungsstufe
 - Wasser- und Luftgehalt des aufbereiteten Oeles

- Hohe Betriebssicherheit und weitgehende Wartungsfreiheit der Schlüsselkomponenten, und der gesamten Anlage.
- Bedienungs- und Wartungsfreundlichkeit.

4. Beurteilungskriterien der Hauptkomponenten von Hochleistungs-Aufbereitungsanlagen

Die Güte von Oelaufbereitungsanlagen hängt nicht nur wie allgemein angenommen, von den Garantiewerten bezüglich Wasser- und Luftgehalt des aufbereiteten Oeles ab, sondern ebenfalls von der Qualität der Anlagenhauptkomponenten. Auch die Betriebsdauer der Anlage ----- nach welcher die Garantiewerte ohne nennenswerte Revisionsarbeiten noch erreicht werden, ist in der Beurteilung zu berücksichtigen.

Nachfolgend wird auf die relevanten Qualitätsmerkmale der einzelnen Anlagekomponenten (siehe Schema S1) hingewiesen:

4.1 Optimierte Konstruktion des Oelwärmers

Um die thermische Belastung des Oeles möglichst tief zu halten, ist ein definierter Oelfluss im Oelwärmer und möglichst kleine Temperaturdifferenz zwischen Heizfläche und Oel gefordert. Die allgemein übliche Annahme, dass eine relativ tiefe spezifische Heizflächenbelastung automatisch eine kleine thermische Oelbelastung ergäbe wird durch Diagramm D7 relativiert. Daraus lässt sich ableiten, dass die thermische Belastung des Oeles nebst der spezifischen Heizflächenbelastung wesentlich

mit der Strömungsgeschwindigkeit variiert
(siehe auch Bild B1).

4.2 Feinfilter

Ausgehend von den unter Punkt 2.3.3 erwähnten Erkenntnissen sollten die Feinfilter:

- optimale Filtrierung bei Filterfeinheiten zwischen
zwischen 1 - 5 μm
- hydrophobe Eigenschaften
- hohe Standzeiten

aufweisen, sowie erhöhte Durchflussmengen für Oelfiltrierung von gefüllten Transformatoren zulassen.

Dabei ist zu beachten, dass die Filterfeinheit nicht allein als Qualitätsmerkmal herangezogen werden kann, sondern mehr vom Kummulations-Filtrationswirkungsgrad ϵ_c resp. vom Filtrationsverhältnis β_x sowie von den installierten Filterflächen resp. Filtervolumen abhängt.

Filtrationsverhältnis

$$\beta_x = \frac{\text{Partikelanzahl} > x \text{ vor dem Filter}}{\text{Partikelanzahl} > x \text{ nach dem Filter}}$$

Kummulations-Filtrationswirkungsgrad ϵ_c

$$\epsilon_c = \left(1 - \frac{1}{\beta_x}\right) \cdot 100 \quad \left[\begin{array}{c} \% \end{array} \right]$$

Aus Diagramm D8 ist ersichtlich, dass der Kummulationsfiltrationswirkungsgrad nebst der Filterfeinheit ebenfalls von der Partikelgrösse sowie vom Verschmut-

zungsgrad des Oeles abhängt.

- Tiefenfilter mit variablen Filterfeinheiten über

die Filtrierstrecke, sowie hydrophoben Eigenschaf-

ten erhöhen wesentlich die Standzeit der Filter
(Bild B2).

4.3 Optimiertes Entgasungssystem

MICAFIL-Entgasungssystem

ist in mehrjährigen Versuchen optimiert worden und hat sich im Betrieb bestens bewährt.

So werden heute bei einstufigen Anlagen im ersten Durchgang Werte erreicht, welche in der Vergangenheit nur mit zweistufigen Anlagen möglich waren.

Das Entgasungssystem ist so zu konzipieren, dass bei möglichst hohem Druck die Garantiewerte bezüglich

Wasser- und Luftgehalt im Oelaustritt gewährleistet sind.

Daraus ergeben sich folgende Vorteile:

- Kleinere Vakuumpumpe, d. h. weniger Energie- und Unterhaltskosten.
- Bei Parallel-Oelaufbereitung mit Transformator-Oelfüllung steht mehr Saugleistung für Transformator-Evakuierung zur Verfügung.
- Weniger Abdestillationen von leichten Oelfractionen.
- Höhere Betriebssicherheit falls Betriebsvakuum in Entgasungsstufe zum Beispiel 1 mbar anstelle 0,2 mbar sein kann.

Die Güte eines Entgasungssystems ist durch den sogenannten Entgasungswirkungsgrad bezüglich Wasserentzug $\eta_{e,W}$ und Luftentzug $\eta_{e,L}$ bestimmt.

$\eta_{e,L}$ und $\eta_{e,W}$ werden durch folgende Faktoren beeinflusst:

- spezifische Beaufschlagung der Entgasungskolonne
- Entgasungsoberfläche
- Verweilzeit
- konstruktiven Aufbau der Entgasungsstufe
- Eigenschaften des Oeles, Viskosität, Oberflächenspannung
- Austrittswerte bezüglich Wasser- und Luftgehalt

Dabei ist:

$$(G1.1) \quad \eta_{e,W} = \frac{P_{k,e,W}}{P_{k,th,W}}$$

$P_{k,e,W}$ = Effektiv im Entgasungskessel vorliegender Wasserdampfpartialdruck

$P_{k,th,W}$ = Theoretisch im Entgasungskessel notwendiger Wasserdampfpartialdruck
(Ostwald, Henry)

Dito für $\eta_{e,L}$

Die für die Oelentgasung notwendige Sauggeschwindigkeit (Seff) der Vakuumanlage basiert auf folgender Gleichung:

$$(GL.2) \quad S_{eff} = \dot{V} \cdot \frac{(\Delta W \cdot f1 + \Delta L)}{(\eta_{e,W} \cdot P_{k,th,W}) + (\eta_{e,L} \cdot P_{k,th,L})} \cdot f2$$

dabei ist:

\dot{V} = Oeldurchfluss pro Zeiteinheit

ΔW = Wasserentzug in ppm

ΔL = Luftentzug in Vol. %

$f1, f2$ = Umrechnungsfaktoren

Die theoretische Sauggeschwindigkeit S_{th} ist analog

$$(GL.3) \quad S_{th} = \dot{V} \cdot \frac{(\Delta W \cdot f1 + \Delta L)}{(P_{k,th,W} + P_{k,th,L})} \cdot f2$$

Aus Gleichung 2 und 3 abgeleitet ergibt sich die relative Sauggeschwindigkeit

$$(GL.4) \quad S_r = \frac{S_{eff}}{S_{th}} = \frac{(P_{k,th,W} + P_{k,th,L})}{(\eta_{e,W} \cdot P_{k,th,W}) + (\eta_{e,L} \cdot P_{k,th,L})}$$

In Diagramm D9 ist die Abhängigkeit der relativen Sauggeschwindigkeit S_r (Grösse der Vakuumanlage) in Funktion der Entgasungswirkungsgrade $\eta_{e,W}$ und $\eta_{e,L}$ dargestellt.

(Siehe auch Bild B3.)

4.4 Oelentleerpumpe zu Entgasungskessel

Absolut gasdichte, wartungsfreie Ausführung ist für -----
die Betriebssicherheit und Qualität der Oelaufbereitungsanlage von entscheidender Bedeutung. Auch kleine und somit schwer festzustellende Lecks an der Pumpe, welche die Saugleistung der Vakuumanlage bezüglich Oelentgasung nur unwesentlich beeinflussen, erhöhen den Luftgehalt des vorgängig in der Entgasungsstufe optimal aufbereiteten Oeles.

(Diagramm D10 zeigt den starken prozentualen Anstieg des Luftgehalts infolge Lecks nach der Entgasungsstufe. (Beispiel: Bei z. B. einem Leck von 2 mbar lt/sek. steigt der Luftgehalt im Oel mit ursprünglich 0,05 Vol.% um 50% d. h. von 0,05 auf ca. 0,75 Vol. % an.

MICAFIL setzt deshalb in Hochleistungsanlagen stopfbüchslöse Pumpen ein, welche keine rotierende Abdichtungen aufweisen und demzufolge auch nach längerer Betriebszeit vernachlässigbar kleine Leckraten gewährleisten.

4.5 Automatische Schaumpegelüberwachung im Entgasungskessel

Bei der Vakuumaufbereitung von Isolierölen entsteht je nach ihrem Alterungszustand, und der chemischen Zusammensetzung - mehr oder weniger Schaum. Die automatische Schaumpegelüberwachung ist für den sicheren Betrieb der Anlage von grosser Bedeutung, da bei unzulässig hohem Oelschaum oder Oelniveau die Anlage automatisch korrek-----
tive Massnahmen einzuleiten hat.

Diese Forderung wird durch photoelektronische Sensoren optimal erfüllt.

4.6 Vakuumanlage

hat einerseits die Aufgabe die im Entgasungskessel anfallenden Gase abzupumpen und andererseits während der Oelfüllung den Transformator parallel auf möglichst tiefem Vakuum zu halten.

Bei Trocknung von Transformatoren mit der Oelanlage muss der aus der Isolation austretende Wasserdampf zusammen mit der Leckluft ebenfalls abgepumpt werden.

- Vakuumanlagen

sind so zu konzipieren, dass sie wahlweise parallel oder einzeln auf den Entgasungskessel oder den zu füllenden Apparat geschaltet werden können.

Da die Vakuumanlage ein Schlüsselement ist, sind:

- hohe Betriebssicherheit
- hohe Wasserdampfverträglichkeit der Vakuumpumpe(n)
- kleine erreichbare Endvakuumwerte

und bei:

- Rootspumpen ein optimales Kompressionsverhältnis sowie Einschaltdruck bei Atmosphärendruck gefordert.

Damit bei der Transformatortrocknung der zeitliche Wasseranfall mit vertretbarer Genauigkeit erfasst werden kann, ist ein gekühlter Auspuffkondensator

sowie Gasballastrückführung empfehlenswert (siehe

Bild B4).

4.7 Wärmerückgewinnungseinrichtungen

sind dann sinnvoll - falls aufbereitetes Oel mit Umgebungstemperatur oder nur leicht erhöhter Temperatur gefordert ist.

Durch optimale Konstruktion der Wärmerückgewinnung kann der Energiebedarf für die Oelaufbereitung um ca. 40 - 50% reduziert werden, was einen schnellen Mittelrückfluss der zusätzlichen Kosten sicherstellt (siehe Bild B5).

Dass moderne Oelaufbereitungsanlagen mit:

- Anschlussmöglichkeiten für Fuller- und Inhibieranlagen sowie
- Qualitätsüberwachungsgeräten für kontinuierliche Messung (siehe Bild B6)

ausgerüstet sind, sowie einfache Bedienung und Wartung entsprechend den verschiedenen Einsatzmöglichkeiten gewährleisten, ist ebenfalls sicherzustellen.

5. Konzept und Aufbau von Standard-Hochleistungs-Oelaufbereitungsanlagen

Die nachfolgend erwähnten Anlagekonzepte sind im Detail in den MICAFIL-Unterlagen dokumentiert, so dass sich im Rahmen dieser Schrift eine detaillierte Beschreibung erübrigt.

- Einstufige Oelaufbereitungsanlagen

mit 2 Vakuumpumpen für Oelaufbereitung mit paralleler Transformator-Evakuierung.

Erreichbare Aufbereitungswerte für Neuöl nach

1 Durchgang:

< 5 ppm Wassergehalt

< 0,5 Vol.% Luft

(siehe Bild B7)

- Einstufige Oelaufbereitungsanlagen

mit 2-stufigen Vakuumpumpstand für Oelaufbereitung oder separater Transformator-Evakuierung.

Erreichbare Aufbereitungswerte für Neuöl nach

1 Durchgang:

< 3 ppm Wassergehalt

< 0,1 Vol.% Luft

(siehe Bild B8)

- Einstufige Oelaufbereitungsanlagen

mit 2-stufigen Vakuumpumpstand für Oelentgasung und separatem 1- oder 2-stufigen Vakuumpumpstand für Transformator-Evakuierung.

Erreichbare Aufbereitungswerte für Neuöl nach

1 Durchgang:

< 3 ppm Wassergehalt

< 0,1 Vol.% Luft

(siehe Bild B9)

- 2-stufige Oelaufbereitungsanlagen

mit 3-stufigen Vakuumpumpstand für Oelaufbereitung
oder separater Transformator-Evakuierung.

Erreichbare Aufbereitungswerte für Neuöl nach

1 Durchgang:

< 1,5 ppm Wassergehalt

< 0,03 Vol.% Luftgehalt

(siehe Bild B10)

6. Aufbereitung von gealtertem Isolieröl

6.1 Alterung des Oel/Papier-Dielektrikums

wird hauptsächlich von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Sauerstoffgehalt im Oel und in der Isolation
- Wassergehalt im Oel und in der Isolation
- Thermische Belastung des Oeles und der Isolation
(Faustregel: 8...10°C Dauerübertemperatur reduziert
die Lebensdauer auf ca. die Hälfte)
- Teilentladung
- Säuren im Oel
- Kupfer wirkt als Katalysator

6.1.1 Alterungsvorgang in der Isolation

Durch die Alterung werden die Zellulosemolekülketten,
welche durch Glucoseringe gebildet sind, verkürzt.

Der Polymerisationsgrad (Anzahl Glucosegruppen im
Zellulosemolekül) nimmt ab. Das heisst, die Reisslänge
eines Papiers verkleinert sich, zudem entstehen Zerset-
zungsproduktgase wie:

C_2H_6 , CO , CO_2

6.1.2 Alterungsvorgang im Oel

ist eine komplizierte Kettenreaktion. Dabei entstehen u. a. Gase wie Wasserstoff H_2 , Methan CH_4 , etc. sowie organische Säuren wie Aldehyde, Ketone, Alkohol, etc.

Durch die Polymerisation und Kondensation entstehen bei gleichzeitiger Wasserabspaltung die Oxidationsprodukte wie: zum Beispiel Ester.

Diese Zersetzungsprodukte sind bis zu einem gewissen Grad im Oel löslich, sie vergrössern die Viskosität und bewirken zusätzlich eine Dunkel-Färbung des Oeles. Mit zunehmender Alterung bilden sich nichtlösliche Makromoleküle (Oelschlamm). Die Säuren greifen nebst der Zellulose auch Kupfer und Stahl an, dabei werden Salze und Seifen gebildet. Diese Metallseifen wirken als Katalysatoren und beschleunigen den Alterungsprozess.

6.1.3 Kennwerte für die Erfassung des Alterungszustandes

Da nebst den unter Punkt 2.2 erwähnten Kennwerten wie

- Durchschlagspannung U_d
- spezifischer Widerstand
- $\tan \delta$
- Gasgehalt
- Wassergehalt

in früheren MICAFIL-Publikationen eingehend auf die nachfolgenden erwähnten Kennwerte für die Beurteilung des Oelalterungszustandes hingewiesen wurde, sind hier nur kurz die Hauptkennwerte aufgelistet.

- Grenzflächenspannung

durch die Oelalterung werden die Molekülketten verändert und deshalb sinkt mit steigender Oelalterung die Grenzflächenspannung.

- Oberflächenspannung

ist weniger empfindlich auf Alterung als die Grenzflächenspannung und wird deshalb selten als Beurteilungskriterium herangezogen.

- Neutralisationszahl NZ

gibt einen Hinweis, ob die Gefahr von Schlamm Bildung besteht.

- Schlammgehalt in Gew. %

gibt Auskunft in welchem Stadium die bereits fortgeschrittene Oelalterung ist.

- Gasanalysen

Durch gaschromatographische Analyse der gelösten Zersetzungsgase und Feststellung der Konzentrationsverhältnisse kann auf allfällige elektrische Entladungen in den Apparaten geschlossen werden.

- Inhibitorgehalt

Bestimmung des noch im Oel vorhandenen Inhibitorgehaltes und Vergleich mit der ursprünglich beigegebenen Konzentration gibt Aufschluss über den Fortschritt der Alterung resp. die Alterungsgeschwindigkeit (zeitlicher Inhibitorverbrauch).

6.2 Behandlung von gealterten Isolierölen

Mit der klassischen Oelaufbereitung werden gealterte Oele nur unwesentlich verbessert, da die im Oel gelösten Alterungsprodukte nur durch Adsorption zu entfernen sind. Als wirksame Methode, die entsprechenden Kenndaten von gealterten Oelen entscheidend zu verbessern, hat sich die Fullerung der Oele mit aktivierter Bleichererde erwiesen (siehe Tabelle D11).

6.2.1 Druckfullerung

Als Fullererde wird Magnesium-Aluminium-Hydro-Silikat mit möglichst grosser Adsorptionsfläche, und entsprechend der Oelart mit verschiedener Körnung verwendet. Die Wirksamkeit der Fullerung hängt von folgenden Faktoren ab:

- Art der Fullererde

Zum Beispiel: Typ Attapulgu Clay 30/60 Mesh, letzteres bedeutet die Maschenweite, durch welche die Fullererde gesiebt wurde.

Ein weiteres Kriterium für die Adsorptionsfähigkeit der Fullererde ist deren Vorbehandlungstemperatur. Ist sie hoch, ergibt sich ein besserer Adsorptionsgrad.

- Zustand der Fullererde

- Zustand des Oeles (Regenerierbarkeit)

- geometrische Abmessung des Fullerkessels, respektive Verweilzeit des Oeles mit dem Adsorptionsmedium.

Auf Diagramm D12 sind auf rein informativer Basis Verbesserungsfaktoren sowie die Abnahme der Neutralisationszahl aufgezeigt.

Fullererde hat Tendenz zugesetzte und natürliche Inhibitoren aufzunehmen. Deshalb ist nach der Fullierung eine Neu-Inhibierung zwingend. Während der Fullierung werden gleichzeitig gewisse Alterungsprodukte aus der Isolation des elektrischen Apparates herausgelöst.

6.2.2 Fullererdeverbrauch

(normal zwischen 6 - 12 Gew. % vom Oel)

hängt vom Zustand des gealterten Oeles und den gewünschten Endwerten des Oeles ab. Es können annähernd gleiche Werte wie für Neuöl erreicht werden.

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Fullierung ist der Fullererdeverbrauch ein wichtiger Faktor.

Im weiteren muss das Alterungsverhalten des gefullerten Oeles in Laborversuchen vorher bestimmt werden.

6.2.3 Inhibierung

Durch die Zugabe von 0,3 - 0,4 % Inhibitor, z. B. 2,6 Ditertiar-Butyl-Para-Kresol (DBPC Handelsname Topanol, Tonol, etc.) erreicht man, je nach Basisoel eine wesentliche Verbesserung des Alterungsverhaltens.

Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- Inhibierung erst nach Abschluss der Fullierung.
(Fullererde absorbiert zum Teil Inhibitor.)
- Nach Verbrauch des Inhibitors steigt die Alterung des Oeles rapid an. Deshalb sollten inhibierte Transformatorenöle mindestens 0,1% Rest-Inhibitor aufweisen.

- Aromatenreiche Oele haben ca. 10% mehr Löslichkeit für den Inhibitor, als aromatenarme Oele.
- Die Löslichkeit steigt mit der Temperatur.
Maximale Löslichkeit je nach Oelart 10 - 15 %.

6.3 Fuller- und Inhibieranlagen

können in Oelaufbereitungsanlagen integriert oder als separate Einheit angeschlossen werden.

(Siehe Schema S2 und Bilder B11, B12.)

L I T E R A T U R :

- (1) - Factors affecting the Ageing of Mineral Insulating Oil
Schober BBC

- (2) - Gas- und Feuchtigkeitsgehalt von Isolierölen und Isolierpapieren
Prof. D. Ing. M. Beyer

- (3) - Ueber den Einfluss geringer Wassergehalte auf die Durchschlagsfestigkeit von Isolieröflüssigkeiten
Schober-Strittmatter

- (4) - Ueberwachung und Unterhalte von Leistungstransformatoren
MICA FIL, Dr. Nabholz / Fr. Benkert

- (5) - Ueber die Hochvakuumtrocknung und Entgasung von Isolierölen für Höchstspannungskabel
ETZ - A 81 (1960)

- (6) - Transformatorenöle
BBC Nachrichten (1963)
W. Casper und W. Kemper

- (7) - Le traitement des transformateurs
Critères de qualité et d'achèvement du processus.
Rapport CIGRE No. 110, 1966
J. Binggeli, J. Froidevoux et R. Kratzer

- (8) Micro Particles in Transformer Oil and Dielectric Wihstand effects
J. Samat, D. Lacaze

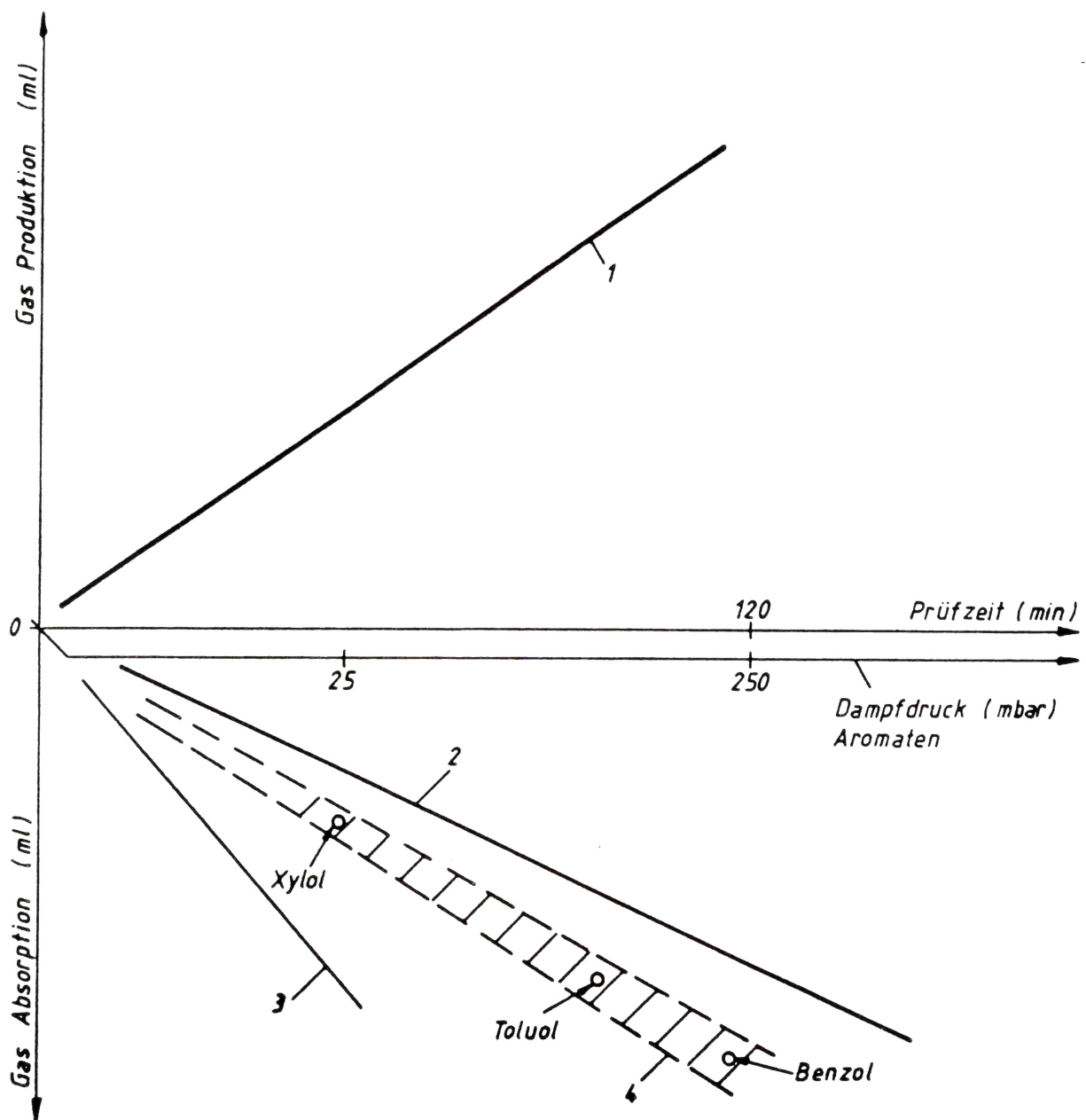


Diagramm D1

Gas-Absorptionsfähigkeit von Ölen (1)

- 1 Gas produzierendes Öl
- 2 Gas absorbierendes Öl
- 3 Gas absorbierendes Öl mit zusätzlichen Aromaten (Toluol, Benzol)
- 4 Gasabsorptionsfähigkeit in Funktion des Dampfdruckes der Aromaten

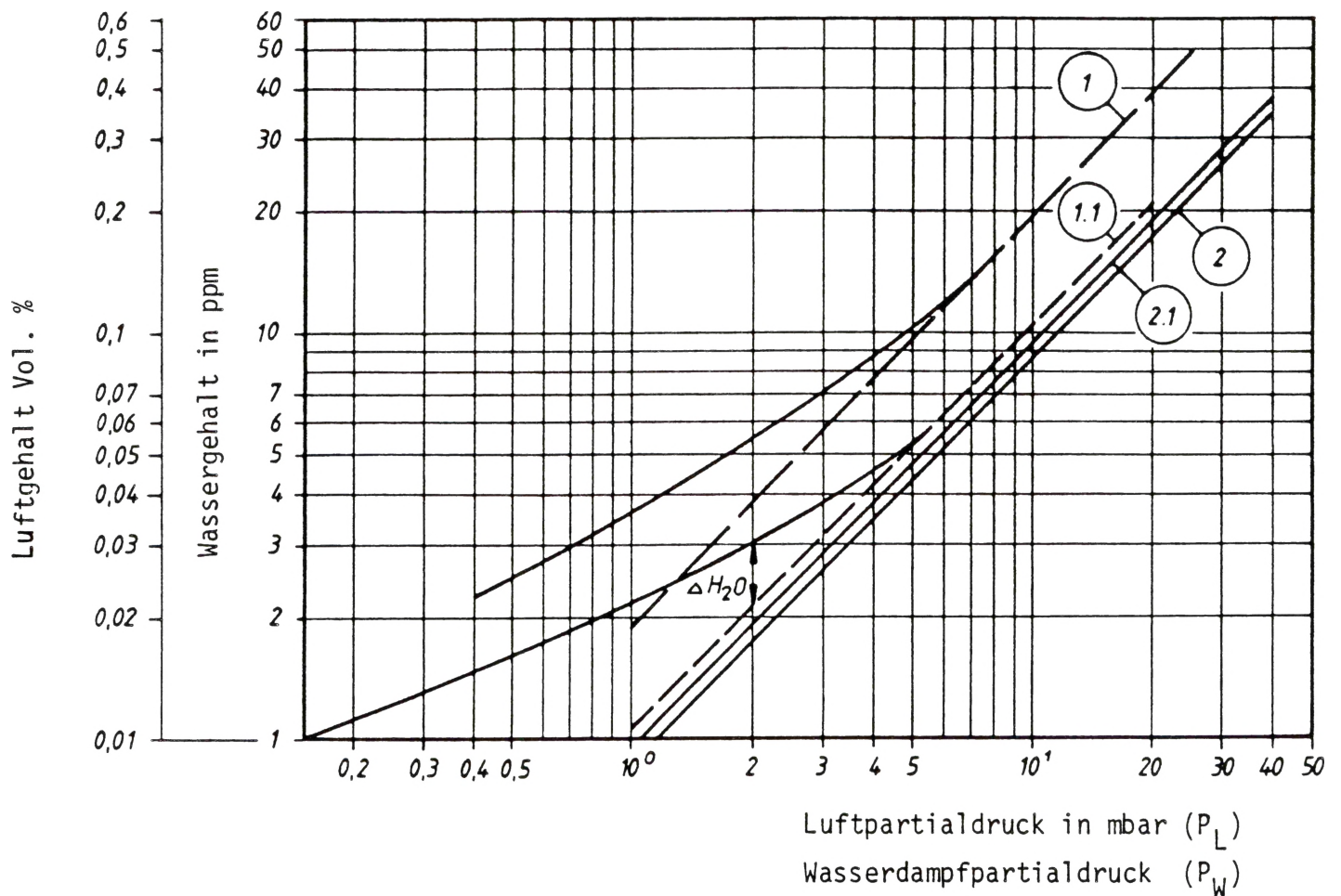


Diagramm D2

Theoretische Luft- und Wassergehalte im Isolieröl in Funktion der überlagerten Partialdrücke

- Kurven: ① Wassergehalt in ppm bei 20°C Öltemperatur
 ①.1 Wassergehalt in ppm bei 60°C Öltemperatur
 ② Luftgehalt in Vol. % bei 20°C Öltemperatur
 ②.1 Luftgehalt in Vol. % bei 60°C Öltemperatur

ΔH_2O - Differenz zu theoretischem Wassergehalt nach Henry
 (Einfluss Van der Waal-Kräfte)

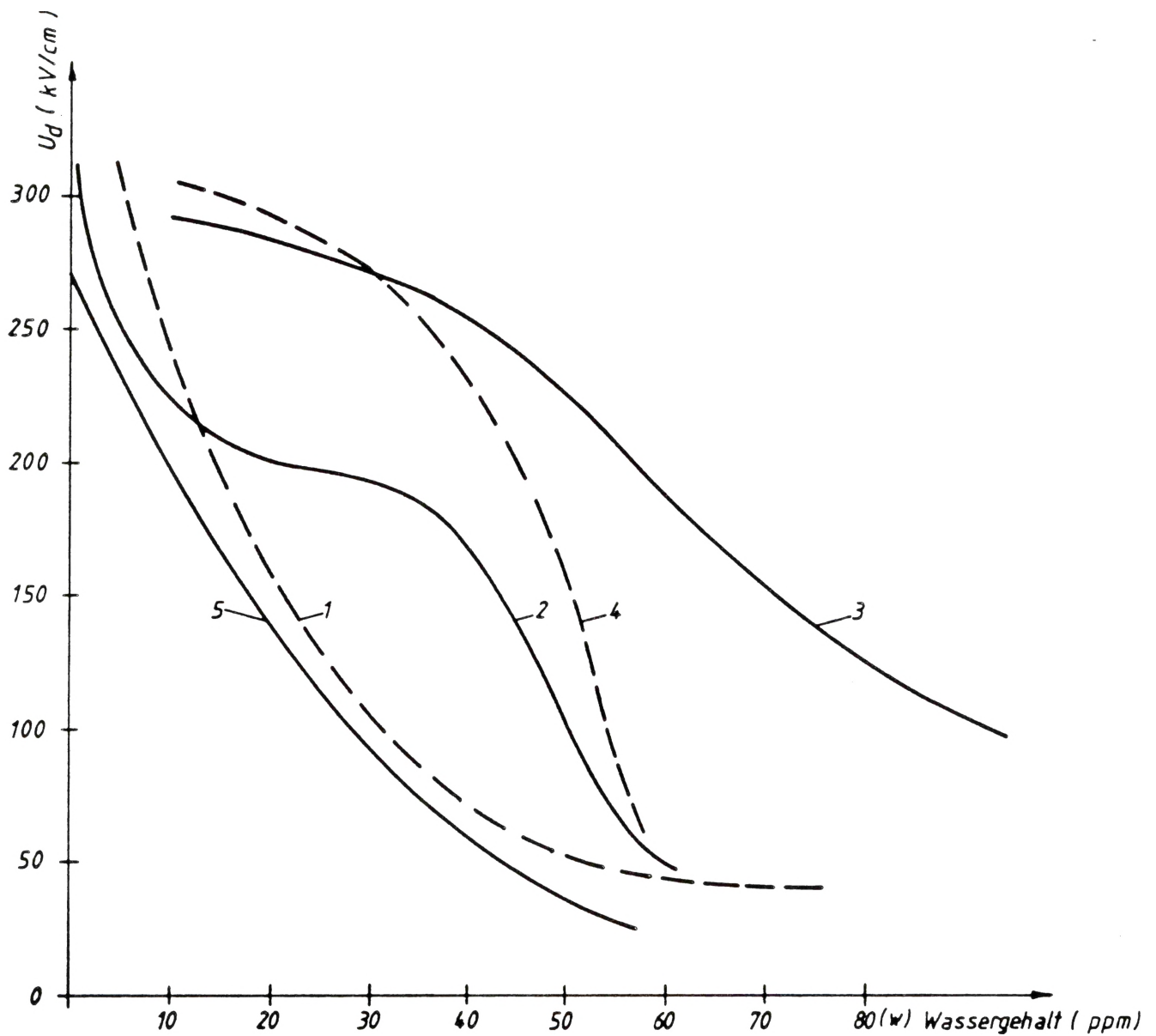


Diagramm D3 Durchschlagspannung (U_d) f (w)

- Kurve 1: nach Casper Kemper (6)
 Kurve 2: nach Brinkmann und Beyer (5)
 Kurve 3: nach Froidevaux, Kratzer (7)
 Kurve 4: Regeneriertes Öl nach J. Schober und W. Strittmatter (3)
 Kurve 5: Künstlich mit $2,5 \times 10^{-3}$ Gew. % Cellulosepartikeln verunreinigtes Neuöl nach J. Schober und W. Strittmatter (3).

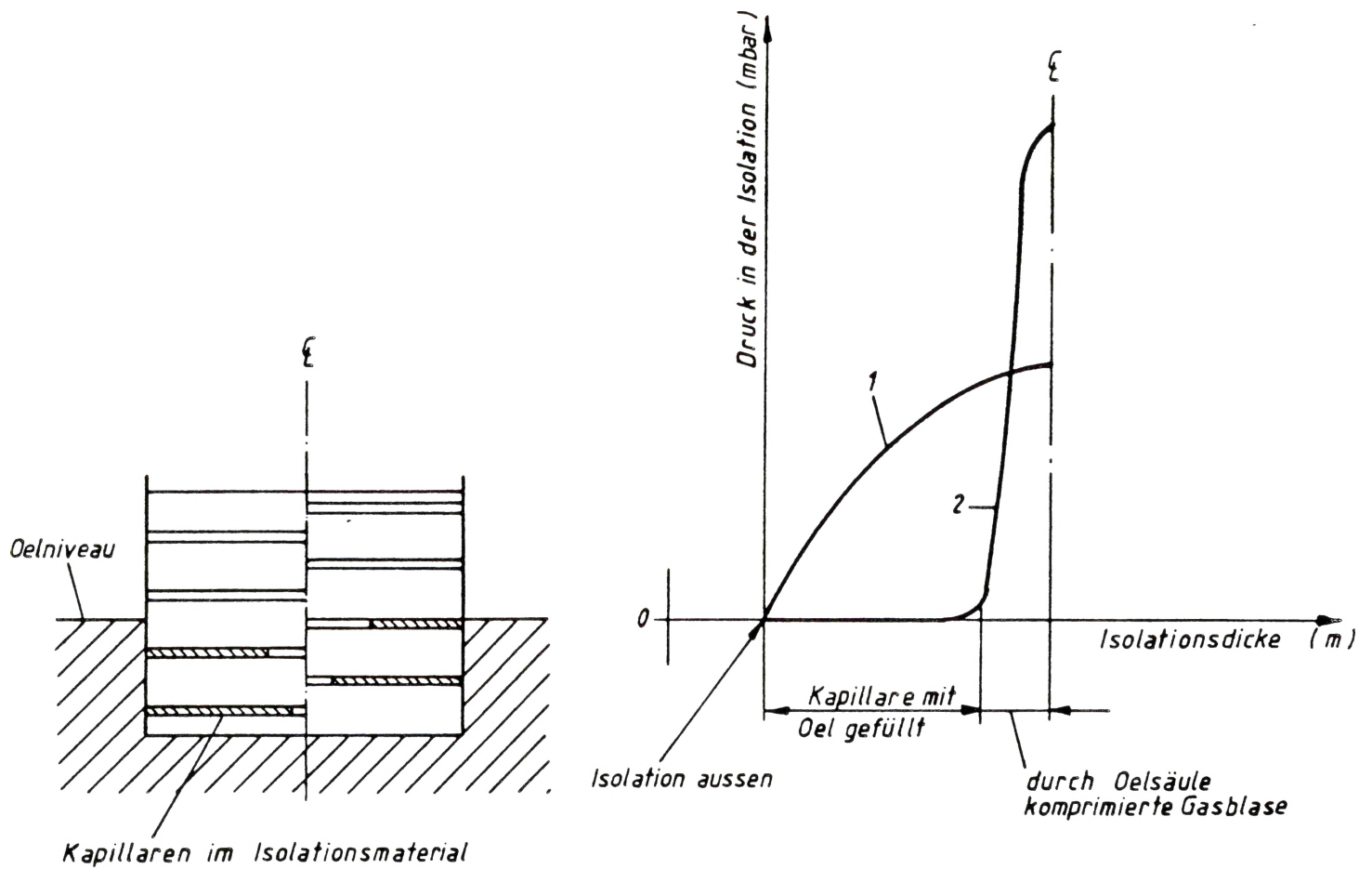


Diagramm D4

Kompression von Restluft in Isolationskapillaren bei Oelimpregnierung

Kurve_1 Druck in Isolation vor Imprägnierung

Kurve_2 Druck in Isolationskapillaren nach Oelfluten

Beispiel: Bei 20 mbar Druck in der Luftblase (entspricht ca. 25 cm Oelsäule) ist der Gleichgewichtsdruck im Oel

$$10\% \text{ Vol.} \times \frac{20}{1000} = 0,2 \text{ Vol. \%}$$

=====

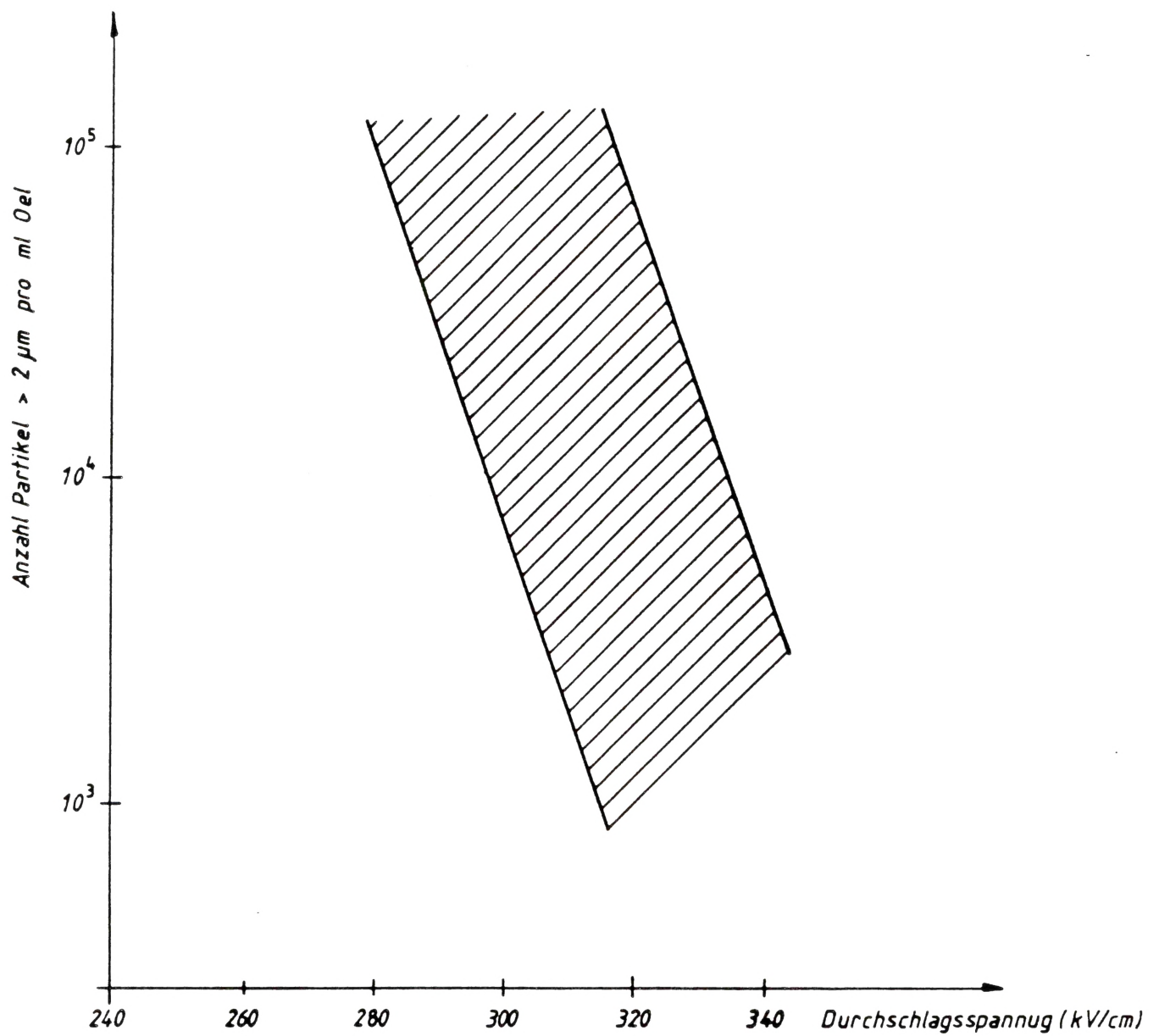


Diagramm D5

Durchschlagspannungsbereich von Öl in Funktion der Anzahl Verschmutzungspartikel.

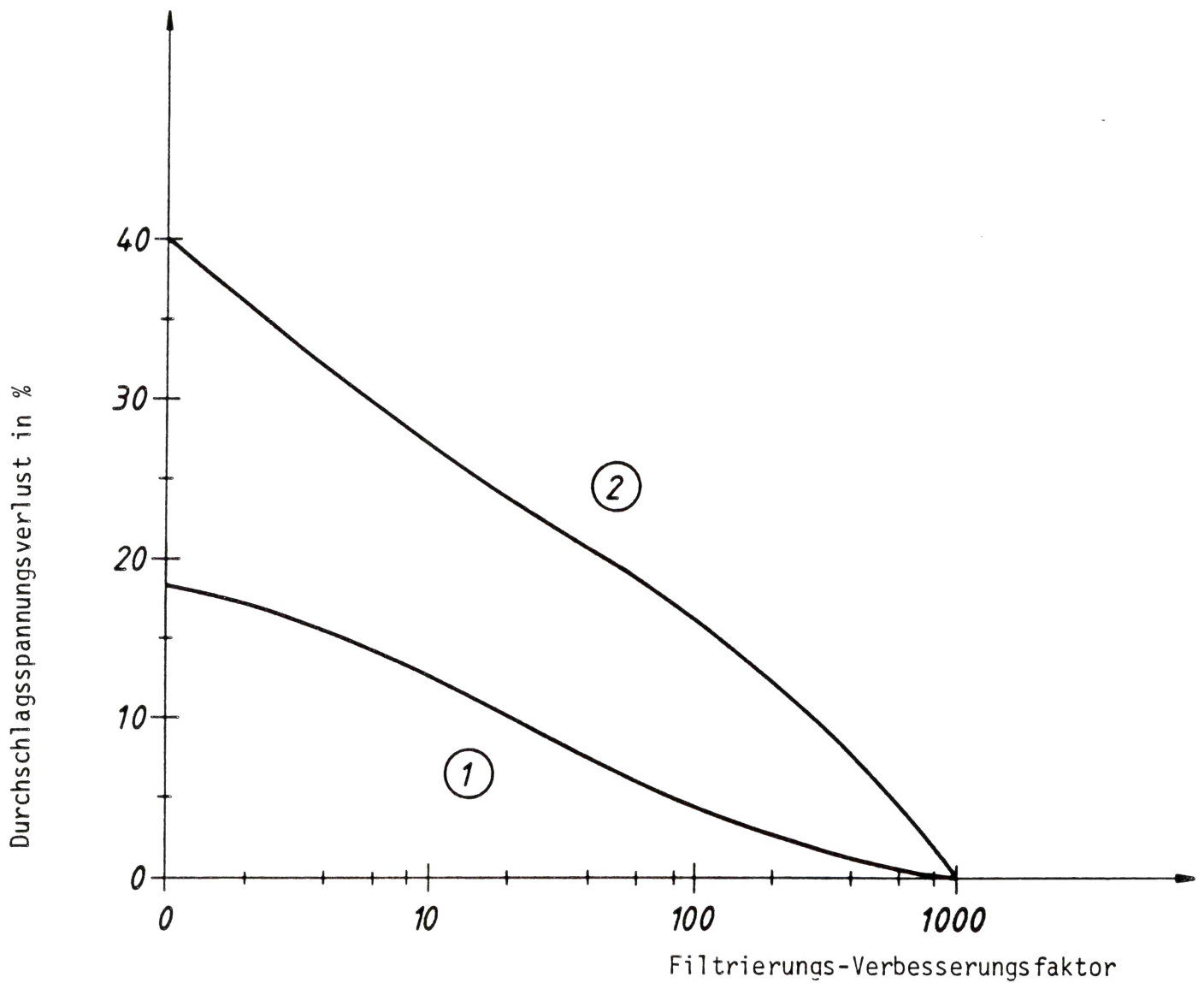


Diagramm D6

Prozentualer Durchschlagsspannungs-Verlust

- ① von nicht zirkulierendem, optimal filtrierte Öl
(Grösste Durchschlagsspannung bei 1500 Partikel > 2 μm in 100 cm^3 Öl)
- ② von zirkulierendem optimal filtrierte Öl
(Grösste Durchschlagsspannung bei 1000 Partikel > 5 μm in 100 cm^3 Öl (8))

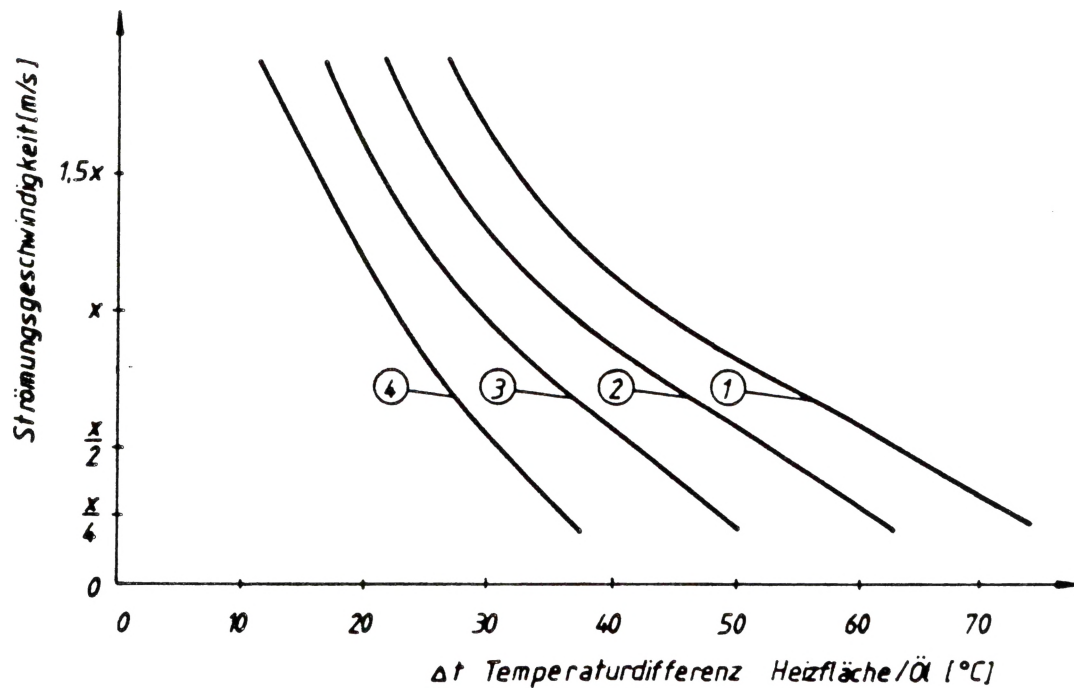


Diagramm D7

Thermische Ölbelastung in Funktion Strömungsgeschwindigkeit und spezifischer Heizflächenbelastung.

- | | | |
|---------|--------------------------|--------------------------|
| Kurve ① | Heizflächenbelastung 1,2 | $[\text{W}/\text{cm}^2]$ |
| Kurve ② | Heizflächenbelastung 1,0 | $[\text{W}/\text{cm}^2]$ |
| Kurve ③ | Heizflächenbelastung 0,8 | $[\text{W}/\text{cm}^2]$ |
| Kurve ④ | Heizflächenbelastung 0,6 | $[\text{W}/\text{cm}^2]$ |

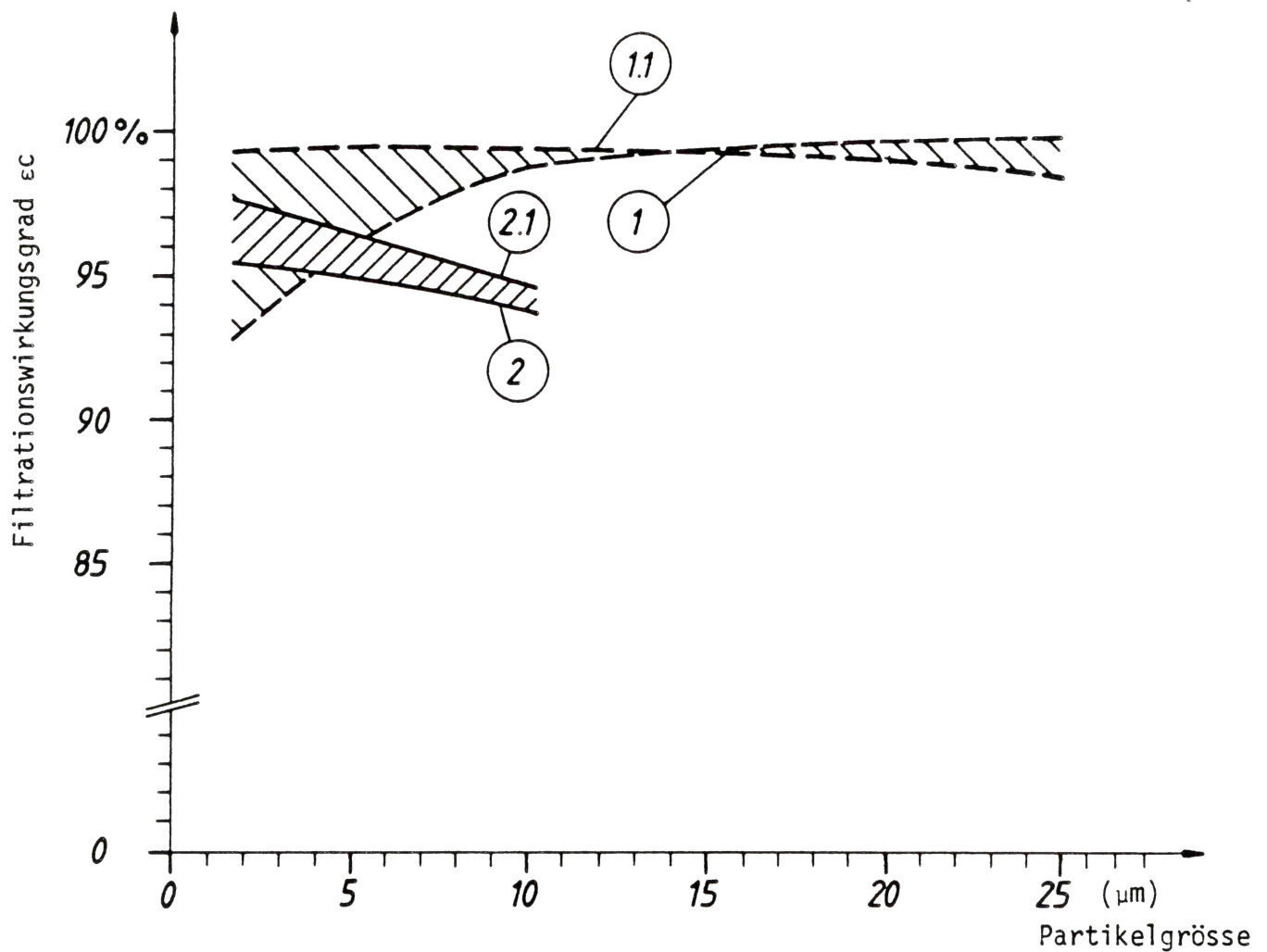


Diagramm D8

Kummulations-Filtrationswirkungsgrad ϵ_c
in Funktion der Partikelgrösse

- für (1) 5 μm Filterfeinheit für stark verschmutztes Öl
 (1.1) 1 μm Filterfeinheit für stark verschmutztes Öl
 (2) 5 μm Filterfeinheit für leicht verschmutztes Öl
 (2.1) 1 μm Filterfeinheit für leicht verschmutztes Öl

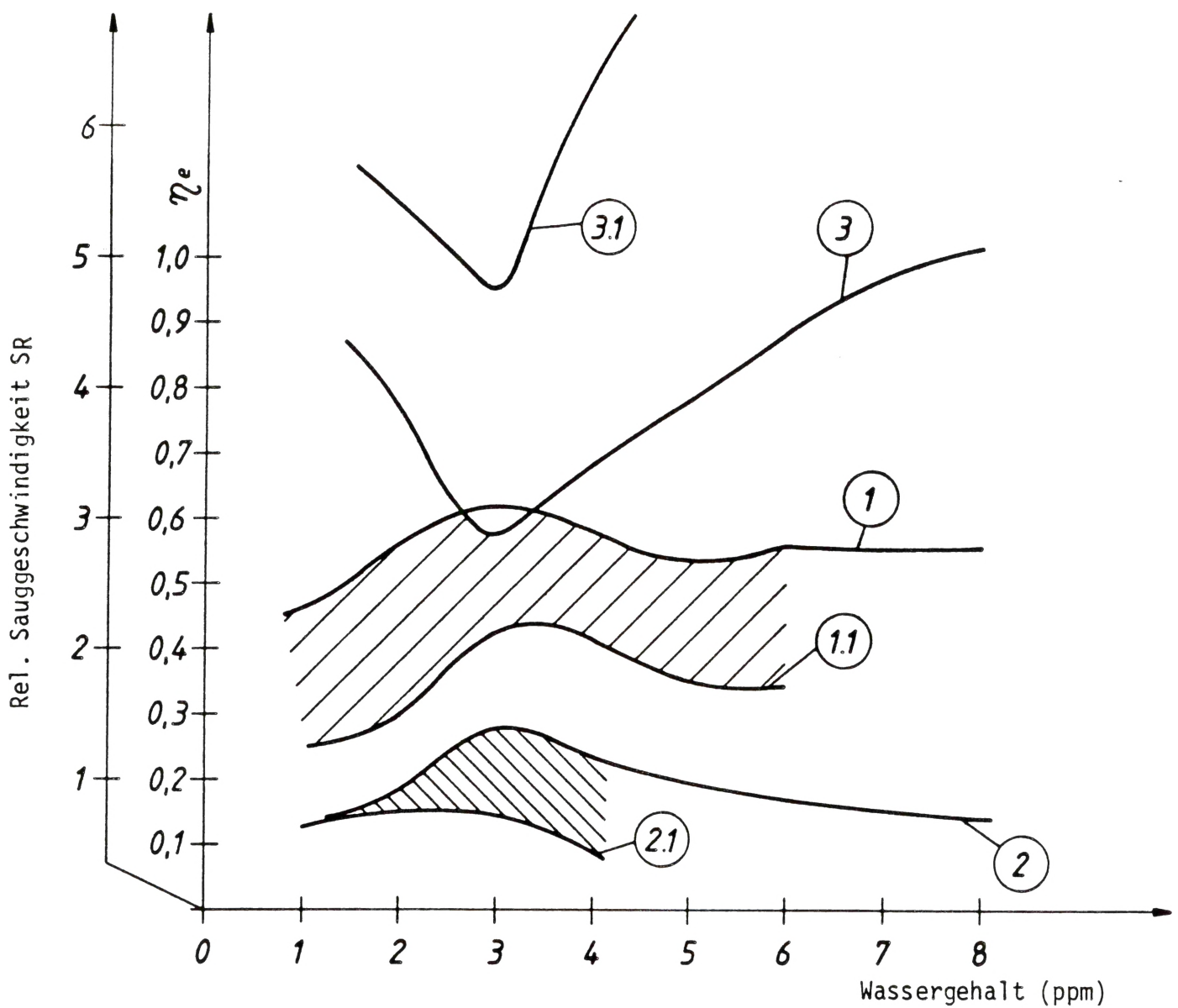


Diagramm D9

Spezifische Sauggeschwindigkeit
Vakuumanlage in Funktion des Entgasungswirkungsgrads η_E

- ① Wirkungsgrad $\eta_{e,W}$
- ①.1 Wirkungsgrad $\eta_{e,W}$ für z.Teil gealtertes Öl
- ② Wirkungsgrad $\eta_{e,L}$
- ②.1 Wirkungsgrad $\eta_{e,L}$ für z.Teil gealtertes Öl
- ③ Relative Sauggeschwindigkeit für Neuöl

$$S_r = \frac{S_{eff}}{S_{theor.}}$$
- ③.1 Relative Sauggeschwindigkeit für teilweise gealtertes Öl

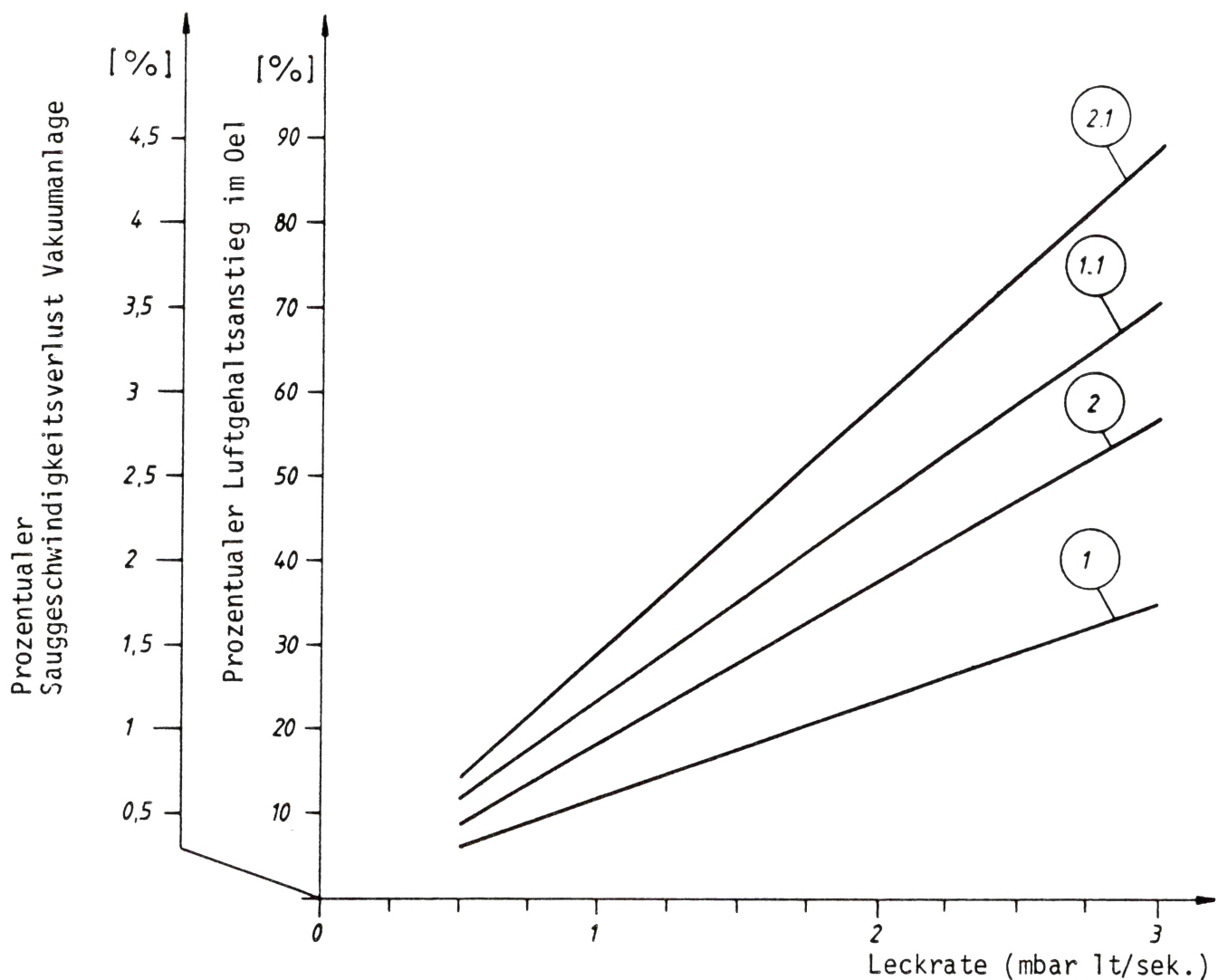


Diagramm D10

Einfluss der Leckrate auf Saugleistung der Vakuumanlage sowie Luftgehalte im entgasten Oel.

Prozentualer Luftanstieg im aufbereiteten Oel bezüglich bei Oeldurchsatz 3000 lt/h.

- ① für ursprünglichen Luftgehalt im Oelaustritt von 0,1 Vol.%
- ①.1 für ursprünglichen Luftgehalt im Oelaustritt von 0,05 Vol.%

Sauggeschwindigkeitsverlust der Vakuumanlage in % infolge Leckrate.

- ② für ursprünglichen Luftgehalt im Oelaustritt von 0,1 Vol.%
- ②.1 für ursprünglichen Luftgehalt im Oelaustritt von 0,05 Vol.%

Ölkenndaten	Verbesserungsmöglichkeit durch:		
	Vakuumaufbereitung inklusive Filtrierung	Fullerung	Inhibierung
Wassergehalt ppm	ja	-	-
Luftgehalt Vol. %	ja	-	-
Durchschlagsspannung Ud	ja	-	-
Spez. Widerstand	unwesentlich	ja	-
tan δ	unwesentlich	ja	-
Grenzflächenspannung	-	ja	-
Neutralisationszahl	-	ja	-
Schlammgehalt	-	ja	-
Inhibitorgehalt	-	-	ja

Tabelle D11 Verbesserung von gealtertem Öl durch diverse Aufbereitungs-
Arten

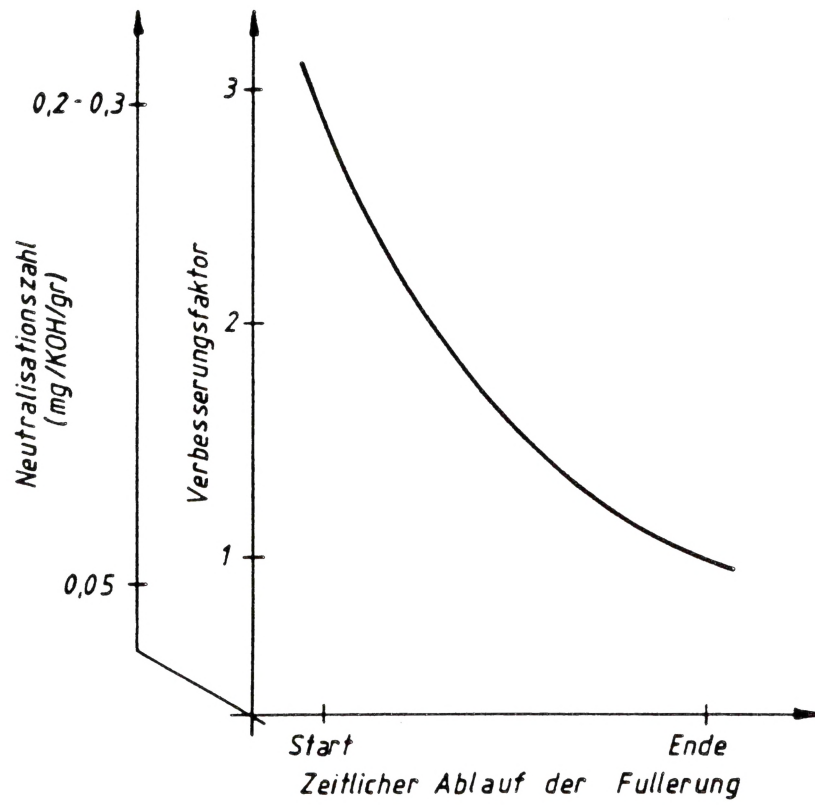
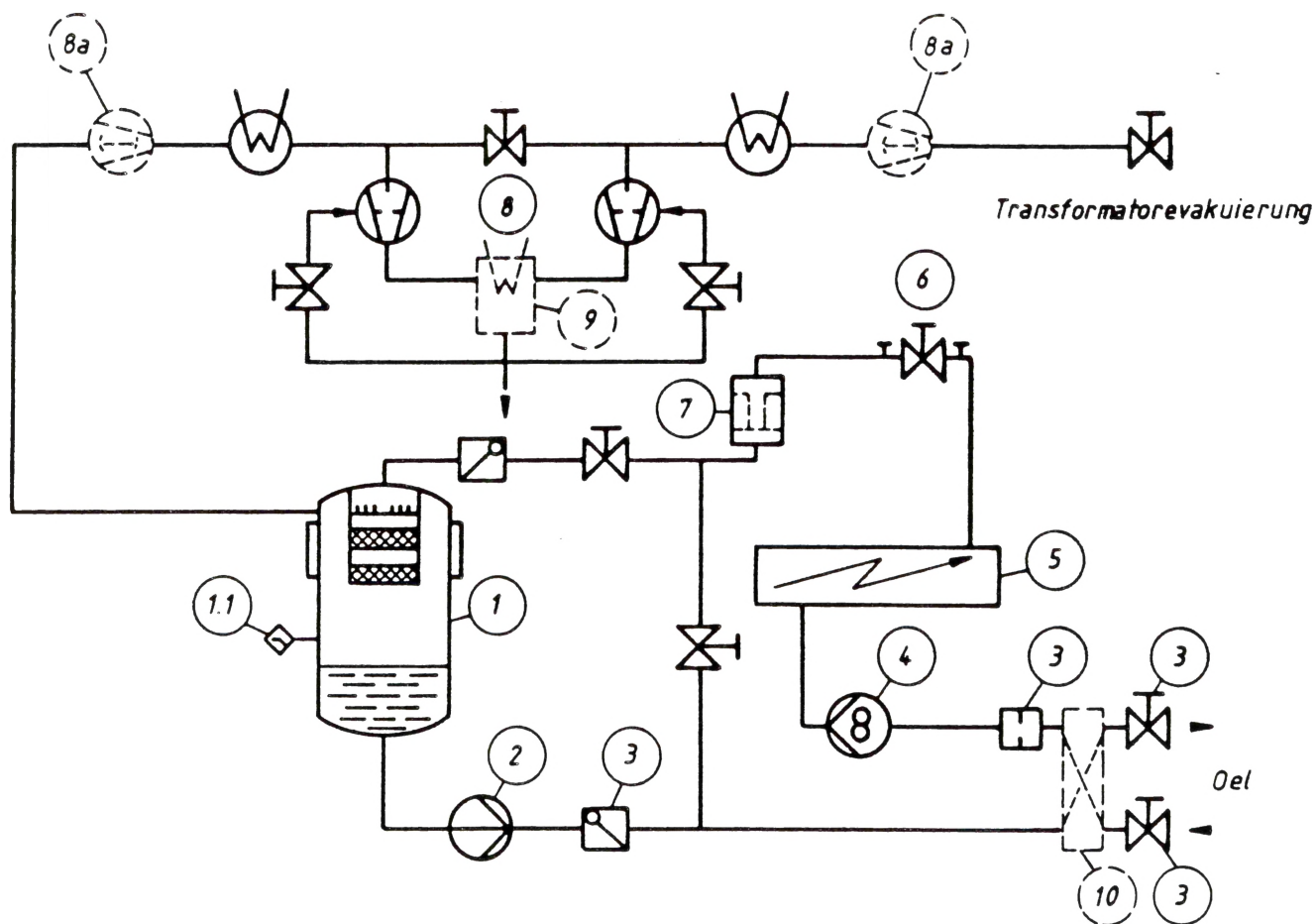


Diagramm D12

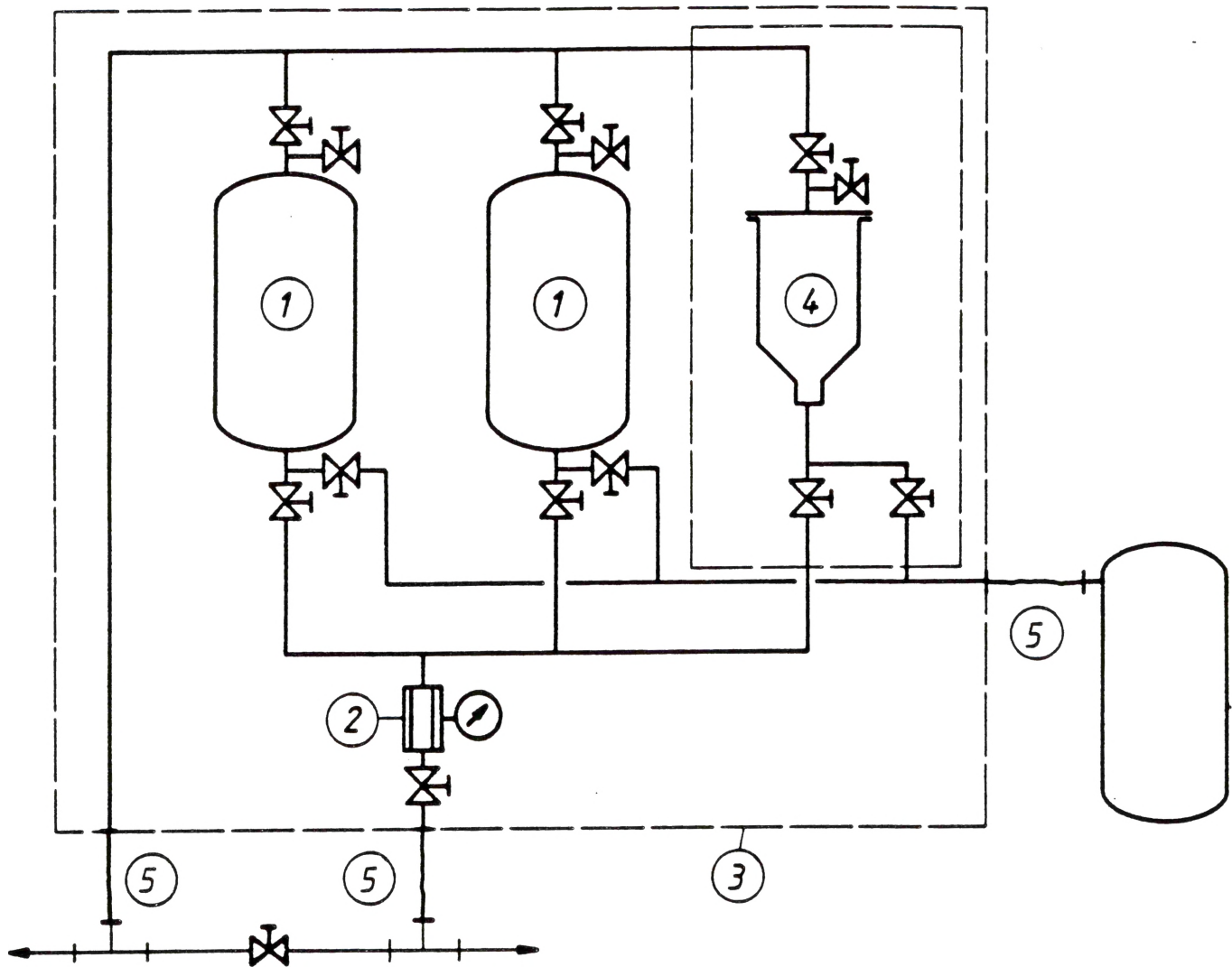
Verbesserungsfaktor bei Druckfullerung



Schema S1

Schlüsselkomponenten einer modernen Oelanlage

- | | | | |
|-----|--------------------------|----|---|
| ① | Entgasungsstufe | ⑦ | Feinfilter |
| ①.1 | Niveauüberwachung | ⑧ | Vakuumanlage |
| ② | Leckfreie Oelförderpumpe | ⑧a | Zusätzliche Rootspumpe |
| ③ | Armaturen | ⑨ | Gekühlter Auspuffkondensator
mit Gasballastrückführung |
| ④ | Oelzufuhrpumpe | ⑩ | Wärmerekuperator |
| ⑤ | Oelerwärmer | | |
| ⑥ | Fulleranschluss | | |

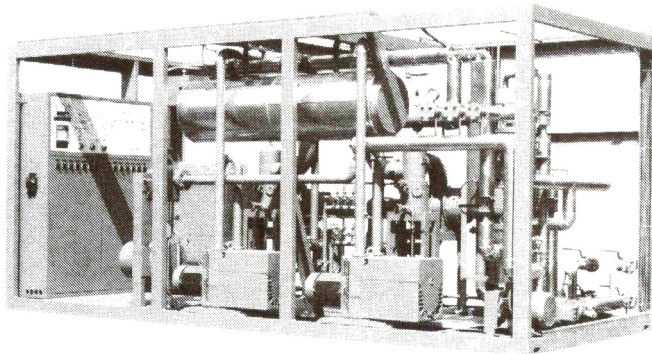


Schema S2

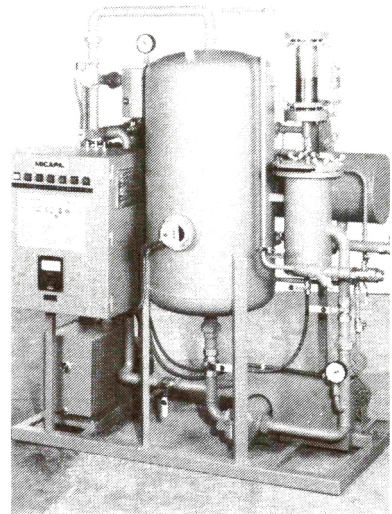
2 Kessel Fuller- und Inhibieranlage

- ① Fullerkessel
- ② Durchflussanzeiger
- ③ Grundrahmen
- ④ Inhibierkessel
- ⑤ Schläuche

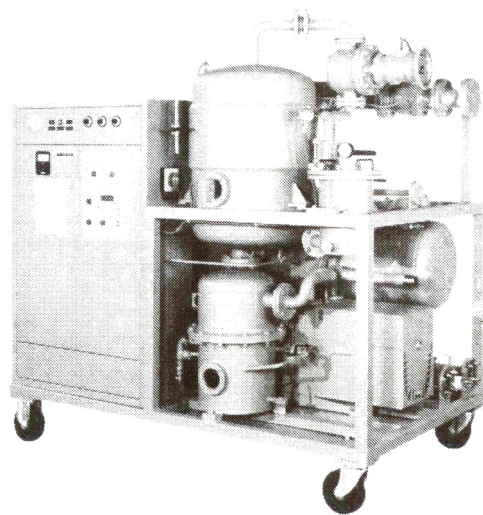
Micafil-Isolieroelaufbereitungsanlagen



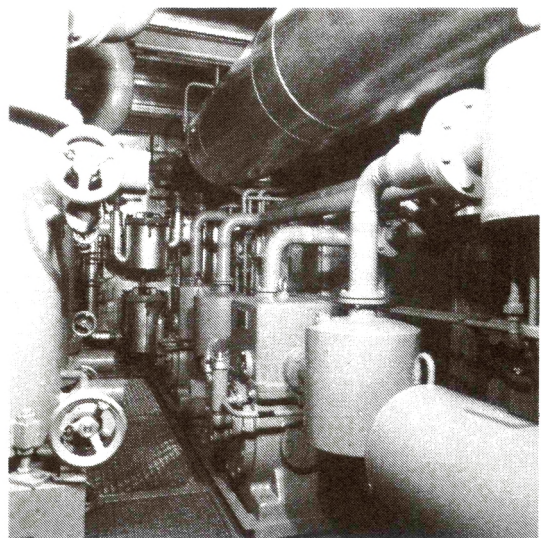
1



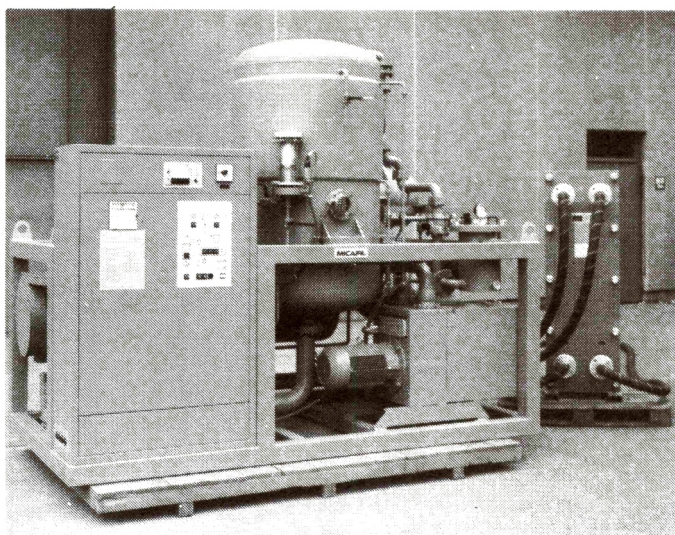
2



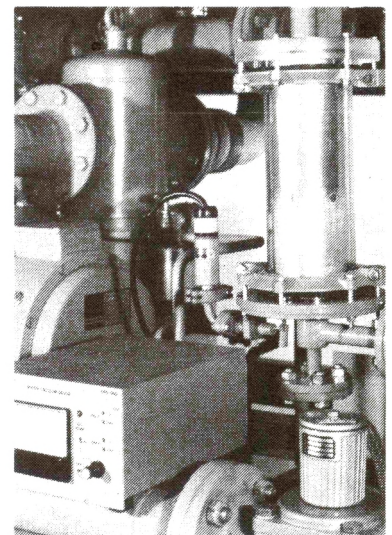
3



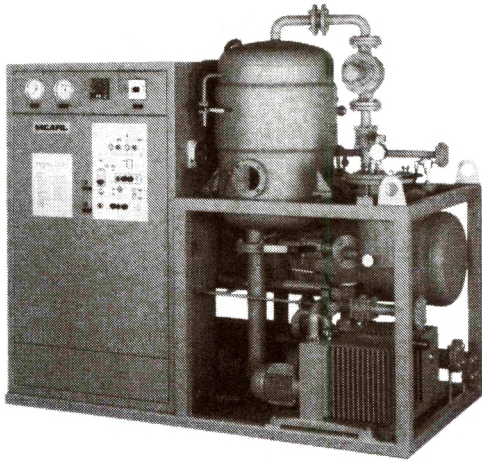
4



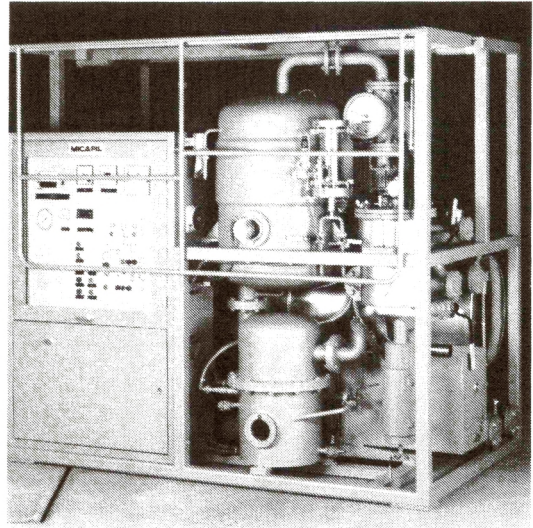
5



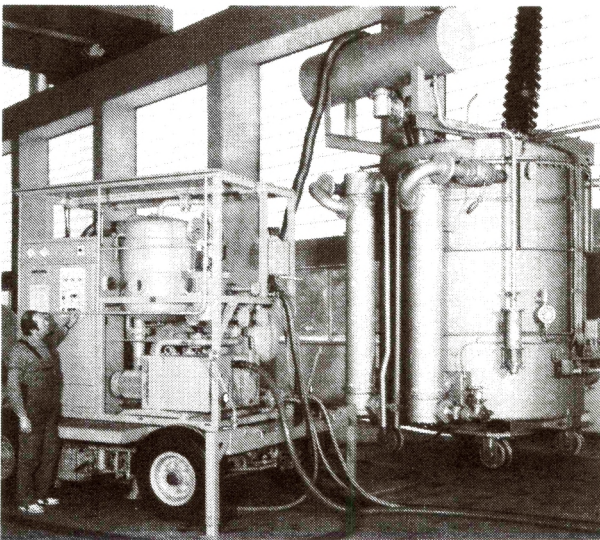
6



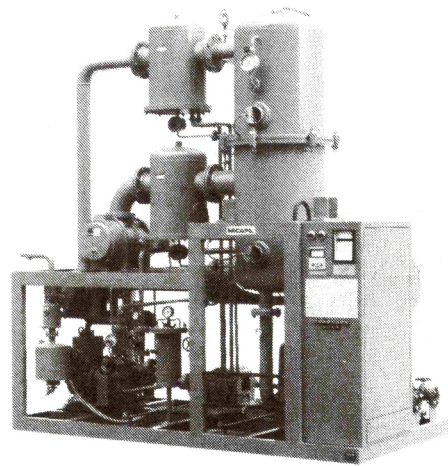
7



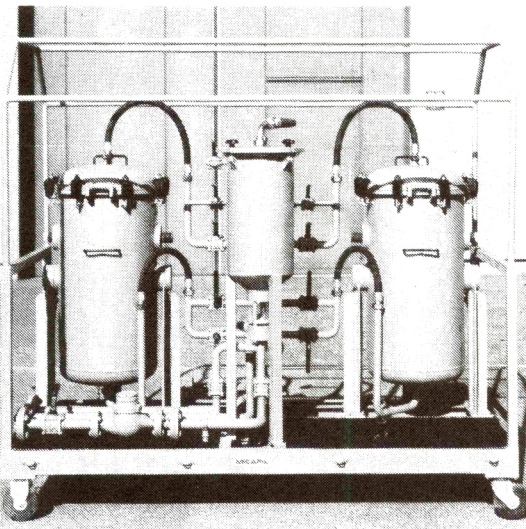
8



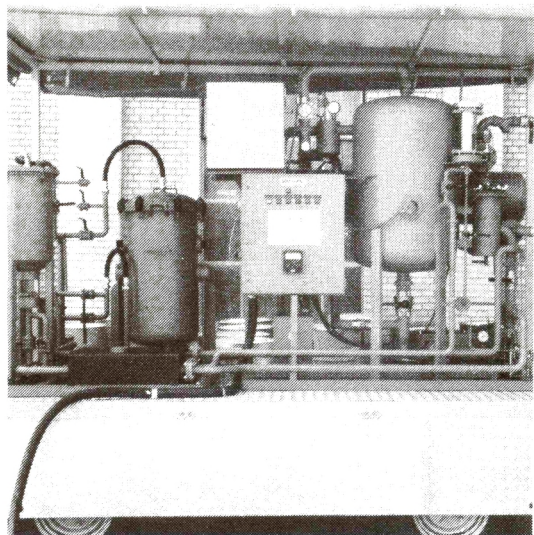
9



10



11



12