

## TRANSFORMATORENTROCKNUNG VOR ORT

---

von P. Gmeiner

### Einleitung

Hochspannungstransformatoren mit in den letzten Jahren ständig gesteigerter elektrischer und thermischer Belastung bedingen, um störungsfreien Betrieb zu gewährleisten, nebst der Oelaufbereitung ebenfalls periodisch eine Trocknung des Papiers.

Unter jahrelangem Betrieb verliert das Öl/Papier-Dielektrikum allmählich seine ursprünglich guten, physikalischen Eigenschaften. Infolge der relativ hohen Betriebstemperaturen von Transformatoren sowie des vorhandenen Luftsauerstoffes ist es einer gewissen "Alterung" unterworfen. Die dabei entstehenden Alterungsprodukte (Säuren, Wasser, Zersetzungsgase, etc.) wirken ebenfalls schädigend auf das Papier. Damit werden je nach Alterungszustand sowie Wassergehalt, die guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften kontinuierlich reduziert.

Die zur Zeit für die Reinigung und Trocknung von Transformatoren im Felde angewandten Trocknungsverfahren sind einerseits Inhalt dieser Schrift. Andererseits wird ebenfalls auf die alternative Trocknungsmöglichkeit mit dem Solventdampfverfahren hingewiesen, sowie deren Vorteile, gegenüber konventionellen Trocknungsverfahren aufgezeigt.

1) Technologische Grundlagen

für die Trocknung von Papier/Cellulose sind in der einschlägigen Literatur, sowie in früheren MICAFIL-Publikationen ausführlich beschrieben.

Um die Unterschiede der einzelnen Trocknungsverfahren im Felde, bezüglich Trocknungszeit, sowie erreichbare Trocknungsqualität aufzuzeigen, sind nachfolgend die wichtigsten Kriterien kurz in Erinnerung gerufen.

1.1 Temperatur

spielt bei der Trocknung die entscheidende Rolle, da der im Innern der Isolation vorliegende Wasserdampfpartialdruck mit steigender Temperatur stark ansteigt (siehe Diagramm D1) und dadurch den Wassertransport resp. die Trocknungsgeschwindigkeit entscheidend verbessert.

Der maximalen Temperatur sind infolge der Materialeigenschaften des Papiers Grenzen gesetzt.

Da die Depolymerisationsrate nebst der Temperatur sehr stark vom Wassergehalt, der Anwesenheit von Sauerstoff und der Behandlungszeit abhängt, kann die max. zulässige Trocknungstemperatur nur im Zusammenhang mit dem Feuchtegehalt in der entsprechenden Prozessphase festgelegt werden.

Als obere Richtwerte dürfen je nach Prozessart, sowie Prozessphase zwischen 80 - 125°C angenommen werden.

Den grossen Einfluss der Temperatur auf die praktisch  
-----  
erreichbaren Endwassergehalte in der Isolation zeigt sich in Diagramm D1, Punkte 1, 2, 3. Daraus ist ersicht-

lich, dass bei wirtschaftlich vertretbaren Trocknungszeiten etwa mit folgenden mittleren Endwassergehalten zu rechnen ist:

- Mittlere Trocknungstemperatur 75°C ergibt ca. 2,5% H<sub>2</sub>O
- Mittlere Trocknungstemperatur 85°C ergibt ca. 1,5% H<sub>2</sub>O
- Mittlere Trocknungstemperatur 115°C ergibt ca. 0,5% H<sub>2</sub>O

## 1.2 Diffusions- resp. Trocknungsgeschwindigkeit $v$

oder anders ausgedrückt - der Diffusionsfluss, welcher in einer gewissen Zeiteinheit durch eine Fläche von 1 cm<sup>2</sup> senkrecht hindurchtritt, basiert auf dem Fick'schen Gesetz.

$$v = D \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$

$v$  = in gr, kg, Mol. oder %

$c$  = Feuchtekonzentration in %

$x$  = Weg resp. Tiefe in cm

$D$  = Diffusionskoeffizient in cm<sup>2</sup>/Tage

$$\left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{d}} \right]$$

ist eine Materialkonstante welche experimentell zu bestimmen ist, sie hängt von folgenden Faktoren ab:

- Materialart (Kapillarquerschnitte und Länge etc.)
- Feuchtegehalt im Material
- Temperatur im Material
- Druckdiffrenz über Diffusionsweg

In Diagramm D2 sind Diffusionskoeffizienten dargestellt.

### 1.3 Forderungen für Erreichung optimaler Trocknungsergebnisse

-----  
Aus der vorgängig erörterten Theorie lässt sich ablei-  
ten, dass optimale kurze Trocknungszeiten sowie Trock-  
nungsqualität dann erreicht werden, falls folgende  
Forderungen erfüllt sind:

- Temperatur der Isolation während des gesamten Trock-  
nungsprozesses möglichst gleichmässig und nahe an der  
max. zulässigen Trocknungstemperatur.
- Möglichst hohe Druckdifferenz zwischen der Isolation  
(innen) und der Umgebung (ausser).

Obwohl das Endvakuum unter einer bestimmten Grenze lie-  
-----  
gen soll, sind allzutiefe Endwerte aus wirtschaftlichen  
-----  
Gründen nicht sinnvoll.  
-----

Als Beispiel dazu:

Falls eine Isolation bei Trocknungsende eine Temperatur  
von 115°C und 0,5% Feuchte aufweist, bildet sich in der  
der Isolation, gemäss Diagramm D1, theoretisch ein Was-  
serdampfpartialdruck von ca. 30 mbar.

Ob nun das Vakuum am Ende der Trocknung 0,1 mbar oder  
0,4 mbar beträgt, hat dies, wie nachfolgendes Beispiel  
zeigt, auf die, die Trocknungsgeschwindigkeit beeinflus-  
sende Druckdifferenz einen vernachlässigbar kleinen Ein-  
fluss.

$$p_1 = 30 - 0,1 \text{ mbar} = 29,9 \text{ mbar}$$

$$p_2 = 30 - 0,4 \text{ mbar} = 29,6 \text{ mbar}$$

## 2) Trocknungsarten von Transformatoren im Felde

### 2.1 Klassische Trocknungsverfahren

In den letzten Jahren haben sich, je nach vorliegender Situation, respektiv Forderungen bei der Revision von Transformatoren wie:

- Zeitdruck
  - Umgebungsverhältnisse  
(Trocknung im Freien, Witterungseinflüsse, etc.)
  - notwendige Anpass- respektiv Anschlussarbeiten der Anlage an den Transformator
  - Spannung und Grösse des Transformators
  - Kapazität der vorhandenen Oelaufbereitungsanlage etc.
- die nachfolgend erwähnten hauptsächlichlichen Trocknungsverfahren durchgesetzt.

Da diese klassischen Trocknungsverfahren in der Literatur, sowie in früheren MICA FIL-Publikationen bereits ausführlich beschrieben sind, wird im Rahmen dieser Ausführung nur noch zusammenfassend kurz auf die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahrensarten hingewiesen.

#### 2.1.1 Oelumwälz-Verfahren

-----  
gemäss Schema S1

Dabei wird das Oel über Oelaufbereitungs- und Fullanlage im Kreislauf umgewälzt bis das Oel die entsprechenden Kennwerte erreicht hat.

Der Vorteil liegt in den relativ einfachen Anschlussarbeiten des Transformators an die Aufbereitungsanlagen. Dies wird jedoch durch den Nachteil erkauft, dass die

Trocknung der Isolation infolge der überlagerten Oelsäule nur via dem umgewälzten, aufbereiteten Oel erfolgt, demzufolge sehr lange dauert und zudem nur beschränkte Trocknungsergebnisse erzielbar sind.

#### 2.1.2 Oelumwälz-Vakuum-Verfahren

-----  
gemäss Schema S2

Hier wirkt sich gegenüber Verfahren Punkt 2.1.1 vorteilhaft aus dass, nach der Transformatoraufheizung auf ca. 80°C, mittels Oelumwälzung, das Oel in Transformator entleert und somit die Isolation direkt dem Vakuum ausgesetzt wird, was eine direkte Abdampfung des Wassers aus der Isolation gewährleistet.

Da infolge der Wasserabdampfung und Wärmeabstrahlung während der Vakuumphase, die Isolationstemperatur wieder stark absinkt, sind den erreichbaren Trocknungsqualitäten Grenzen gesetzt.

#### 2.1.3 Pulsations-Oelumwälz-/Vakuum-Verfahren

-----  
Anordnung im Prinzip ebenfalls wie Schema S2.

Bei diesem Verfahren werden mehrmals Oelumwälz/Vakuum-Phasen mit steigenden Aufbereitungstemperaturen wiederholt.

Dies gewährleistet gegenüber Verfahren Punkt 2.1.2 schon wesentlich bessere Trocknungswerte, da während der letzten Vakuumphase ein geringerer Wasseranteil abgedampft wird und demzufolge die Temperaturabsenkung in der Isolation kleiner ist.

Die in der Praxis erreichbaren Trocknungstemperaturen von ca. 75 - 80°C gewährleisten jedoch noch keine optimale Trocknungsqualität (siehe auch Punkt 1.1).

Auch liegt hier wie beim vorgängig erwähnten Verfahren der Energiekonsum hoch, da neben dem Transformator das gesamte Öl mehrmals aufzuheizen ist.

#### 2.1.4 Öl-Spray-Trocknung

-----

Anordnung gemäss Schema S3

Die in den erwähnten Verfahrensarten (2.1.1 - 2.1.3) resultierenden Nachteile werden hier grösstenteils eliminiert da:

- während der gesamten Aufheizphase (Spray-Prozess) der Transformator unter Vakuum steht und demzufolge aus der Isolation kontinuierlich Wasser abgedampft wird.
- Trocknungstemperaturen infolge Verwendung eines separaten "Spray-Öles" von 100°C erreicht werden, dadurch sind bei wirtschaftlich vertretbaren Trocknungszeiten (5 - 6 Tagen), Restwassergehalte < 1,5 % erreichbar.

Die Nachteile des Verfahrens sind:

- Düsenanordnung beeinflusst wesentlich eine gleichmässige Trocknungstemperatur respektiv die Trocknungsqualität.
- Infolge der nach wie vor ölprägnierten Isolation, verringert sich der Diffusionskoeffizient um ca. Faktor 20 gegenüber trockener Isolation.
- Aufwendigere Vorbereitungsarbeiten (Düseneinbau) als für die vorgängig erwähnten Verfahren.

## 2.2 Solventdampftrocknung

Die Merkmale dieses seit über 20 Jahren in der Transformatorenfertigung sehr erfolgreich, applizierten Verfahrens seien kurz in Erinnerung gerufen.

- Prozess findet weitgehend unter Ausschluss von Luft und damit Sauerstoff statt.
- Einerseits wird das Trocknungsobjekt infolge Kondensation eines geeigneten Wärmeträgers (Solvent mit kleinerem Dampfdruck als Wasser) aufgeheizt und andererseits gleichzeitig das Wasser aus der Isolation kontinuierlich abgedampft (siehe Diagramm D3).

Daraus ergeben sich die bekannten Vorteile der Solventdampftrocknung wie:

- schnelle und gleichmässige Aufheizung des Trocknungsobjektes.
- optimale Trocknungsqualität, da infolge sauerstofffreier Atmosphäre die Trocknungstemperatur bis auf 120 - 125°C gesteigert werden kann.

Die dadurch erzielten Vorteile gegenüber den vorgängig erläuterten Verfahrensarten bezüglich Diffusionskoeffizient sowie Druckdifferenz zwischen inneren und äusseren Isolationsschichten sind in Diagramm D4 dargestellt.

- Kleine Depolymerisation, da kurze Trocknungszeit und der Wasserentzug bereits bei relativ tiefer Temperatur beginnt, dadurch liegen während des Trocknungsprozesses kleinere, mittlere Wasserge-

halte der Isolation vor - als bei bisher angewandten Prozessen (siehe Diagramm D5).

- homogene Trocknungsqualität.

- Bei ölimprägnierten Wicklungen geht das in die Isolation eindringende Solvent mit dem Oel in Lösung und wird zusammen mit den Alterungsprodukten weitgehend ausgewaschen. Dadurch resultieren speziell in der Endphase der Trocknung wesentlich höhere Diffusionskoeffizienten als bei den klassischen Trocknungsverfahren (siehe Diagramm D5, Kurve 3.3).

#### 2.2.1 Ablauf eines konventionellen Trocknungsprozesses

Ein kompletter Solventdampftrocknungsprozess unterteilt sich in 4 Hauptphasen (siehe Diagramm D6).

Da diese Betriebsphasen in früheren MICA FIL-Publikationen schon ausführlich beschrieben worden sind, erübrigt sich eine detaillierte Umschreibung.

Die 4 Phasen sind:

- Vorbereitungsphase
- Aufheizphase
- Drucksenkungsphase
- Feinvakuumphase

#### 2.2.2 Moderner Trocknungsprozess

sollte basierend auf den unter Punkt 1 erwähnten Trocknungstheorie so gefahren werden, dass:

- möglichst viel Wasser bei möglichst tiefen Temperaturen entzogen wird.  
-----
- gleichmässige Aufheizung auch von innenliegenden, dünnen Isolationskanälen gewährleistet ist.
- bei Start Feinvakuumphase ein möglichst kleiner Wassergehalt in der Isolation vorliegt, dadurch resultiert infolge Wasserverdampfung während der Endphase der Trocknung eine kleine Temperaturabsenkung der Isolation.
- möglichst hohe gleichmässige Temperatur der Isolation speziell bei Trocknungsende.

#### 2.2.3 Anforderungen an fahrbare Solventdampftrocknungsanlagen

leiten sich basierend aus den unter Punkt 2.2.2 sowie den in früheren MICAFIL-Publikationen aufgeführten Überlegungen wie folgt ab:

- Stufenweise Temperatursteuerung während Aufheizphase.
- Aufheizphase mit, zu verschiedenen Zeiten, eingeleiteten Zwischendrucksenkungsphasen.  
(Abhängig von Trocknungsobjekt).
- Einwandfreie Erfassung des Wasseranfalls während den Zwischendrucksenkungsphasen als Beurteilungsparameter für die Prozesssteuerung der Aufheizphase.
- Korrekte Steuerung der Kondensatrückführrate abhängig vom Isolationsgewicht sowie vom zeitlichen Wasseranfall.
- Anlagenkonzept sowie Leistung des Kondensationssystems so, dass Zwischendrucksenkungsphasen einfach und in kurzer Zeit durchgeführt werden können.  
-----

- Guter Wirkungsgrad der Anlage bedingt Wärmerückgewinnung im Kondensationssystem.  
-----
- Weitgehende Ausnutzung der im Kondensationssystem anfallenden Wärme für Aufheizung des Transformators.
- Optimale Prozessführung bezüglich der wichtigen Prozessparameter wie Temperatur, Vakuum und Wasseranfall.
- Trocknung von Öllimprägnierten Transformatoren mit gleichzeitiger Abdestillation des Öeles während der ----- Aufheiz- respektiv den Zwischendrucksenkungsphasen.  
(Dieser Verfahrensablauf ist patentrechtlich geschützt.)
- Reproduzierbare Prozesssteuerung durch Ueberwachung der einzelnen Prozessphasen und Erfassung der relevanten Umschaltparameter.
- Automatisch wirkendes Sicherheitssystem - um Entstehung gefährlicher Zustände zu verhindern sowie zu signalisieren.
- Registrierung aller für die Qualitätssicherung notwendigen Prozessdaten.
- Optimale Anlagenkonzeption respektiv Konstruktion der Anlagenkomponenten, um Abmessungen und Gewicht der fahrbaren Anlage in vertretbaren Rahmen zu halten.
- Autarkes Anlagekonzept.  
(Ausnahme elektrische Versorgung.)

3) Aufbereitungs- resp. Trocknungs-Anlagen

3.1 Fahrbare Anlagen für Verfahren gem. Pkt. 2.1.1 - 2.1.4

Da Aufbau und Ausrüstung gemäss Schema S4, in früheren MICAFIL-Publikationen ausführlich beschrieben wurde, sind nachfolgend nur die wichtigsten Anforderungen an die Oelaufbereitungs- respektiv Trocknungsanlagen zusammengefasst:

- Transformator-Aufheizung mit erhöhter Oelumwälzmenge und entsprechender Heizleistung.
- Optimale Filtrierung bei erhöhter Oelumwälzung.
- Parallele Transformator-Evakuierung während Transformator-Aufheizung.
- Parallele Transformator-Evakuierung während Transformatoroel-Füllung.
- Wassermesseinrichtungen zur Erfassung des zeitlichen Wasseranfalls.
- Einfache Bedienung und Wartungsmöglichkeit.

(Siehe Bilder B1, B2.)

3.2 Fahrbare Solventdampftrocknungs-Anlagen

Da auch in Zukunft die thermische und elektrische Belastung der Transformatoren weiterhin steigende Tendenz aufweisen dürfte, werden vermehrt optimale Revisionstrocknungen notwendig sein.

Dem Bau von fahrbaren Solventdampftrocknungsanlagen  
-----  
mit vertretbarer Grösse und Gewicht stehen infolge:

- der mannigfaltigen technologischen Vorteile  
-----

(Trocknungszeit, Trocknungsqualität, Auswaschung

der Alterungsprodukte, kleine Depolymerisationsrate, geringer Energiebedarf der Solventdampftrocknung, etc.) welche durch eine moderne Solventdampf-Trocknungs-Prozesstechnologie noch verstärkt werden.

- der konsequenten jahrelangen Weiterentwicklung resp. -----  
Optimierung der Anlagenkonzepte wie:

verbesserter Wirkungsgrad durch Wärmerekuperation, automatische Oeldestillation während den Zwischen-drucksenkungsphasen ohne zusätzlichen anlagetechnischen Aufwand.

- dem Einsatz von volumen und gewichtsmässig, optimier-----  
ten Anlagekomponenten  
-----  
keine wesentlichen Hindernisse mehr im Wege.

Die Gewährleistung einer besseren Trocknungsqualität, und somit einer erhöhten Lebensdauer von Solventdampfgetrockneten Transformatoren, dürften den gegenüber klassischen Trocknungsanlagen erhöhten finanziellen ----- Aufwand von Solventdampftrocknungsanlagen rechtfertigen.

Schematischer Aufbau sowie Grösse einer fahrbaren Solventdampftrocknungsanlage sind auf Schema S5 und S6 ersichtlich.

L I T E R A T U R :

- (1) MICAFIL-Nachrichten, von G. Oesch  
Oil-Spray-Trocknung von Transformatoren
- (2) MICAFIL-Nachrichten, von P. Gmeiner  
Moderne Solventdampftrocknungsprozesse und Anlagen
- (3) W. Lampe Beitrag zur Berechnung der notwendigen  
Trocknungszeit von Grosstransformatoren
- (4) Prof. Dr. Ing. Beyer  
Gas- und Feuchtigkeitsgehalt von Isolierölen und  
Isolierpapieren
- (5) Bouvier  
Nouveaux critères pour caractérier la dégradation  
thermique d'une isolation à base de papier

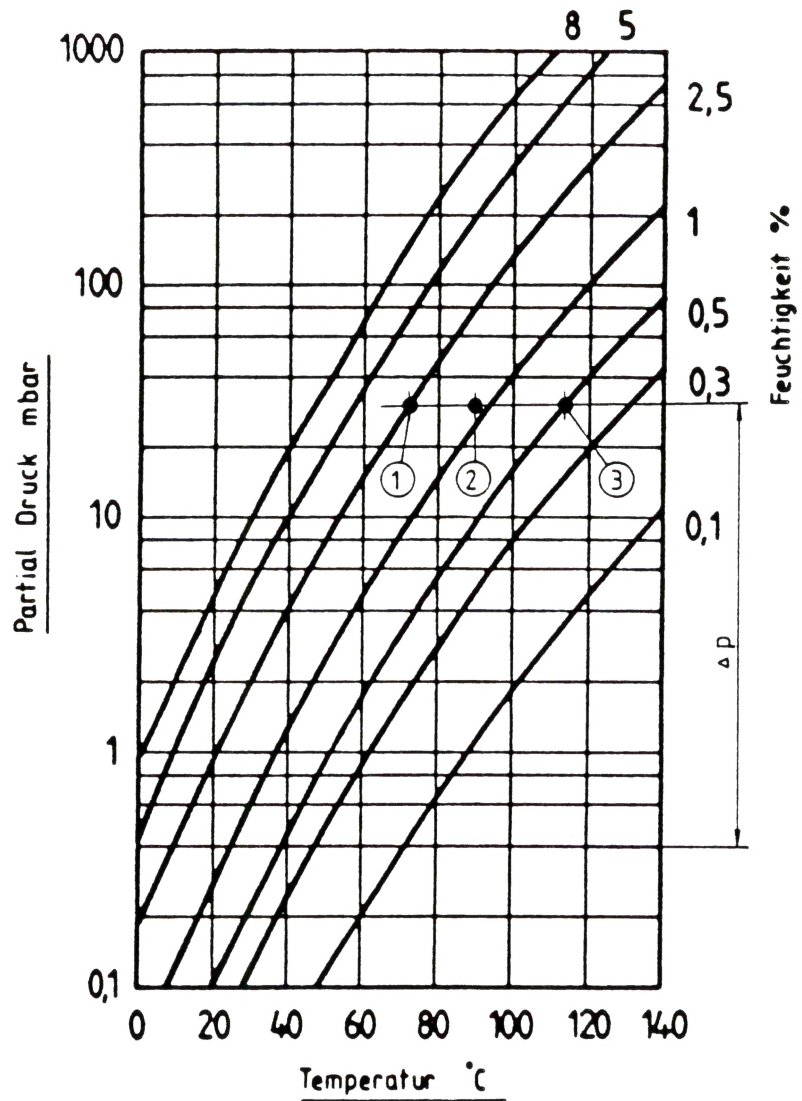


Diagramm D1

Wasserdampfpartialdruck in der Isolation in Funktion der Temperatur bei verschiedenen Isolationsfeuchten.

$\Delta P$  = Theoretische Druckdifferenz bei Trocknungsende und Umgebungsdruck von 0,4 mbar

Vergleich theoretische Isolationsfeuchte-Gehalte bei identischen  $\Delta P$

- ① Oel-Umwälz / Vakuum-Trocknung
- ② Oel-Spray-Trocknung
- ③ Solventdampf-Trocknung

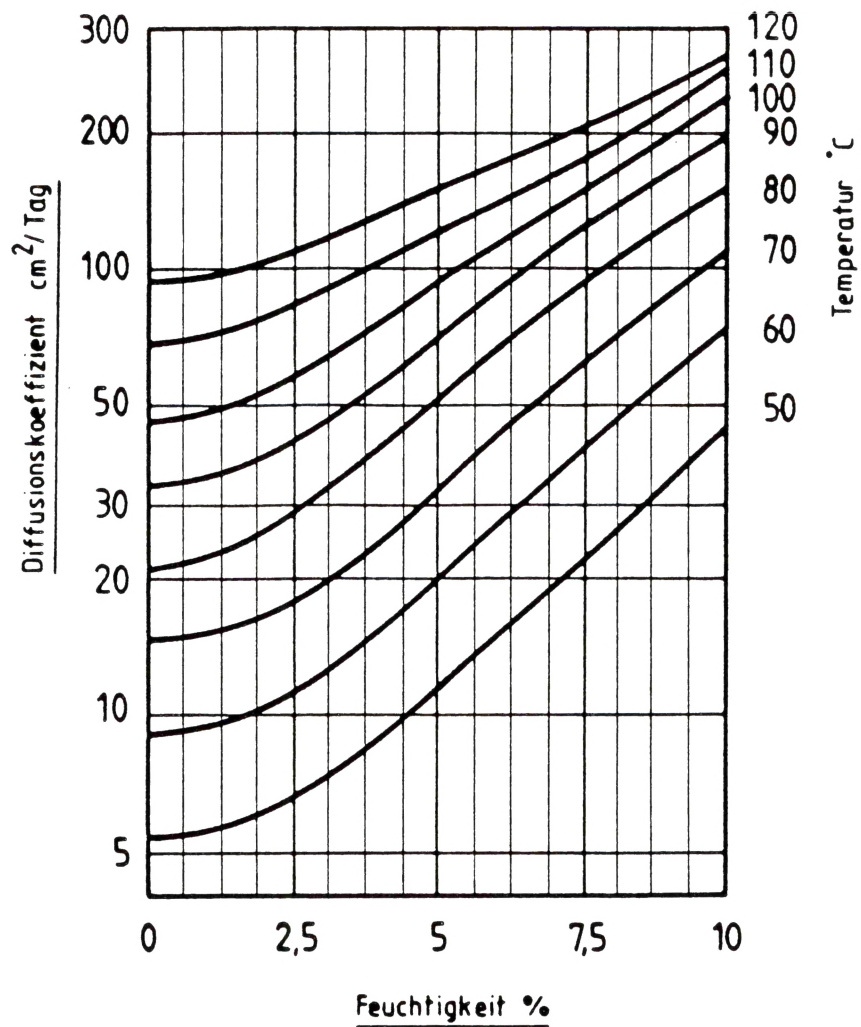
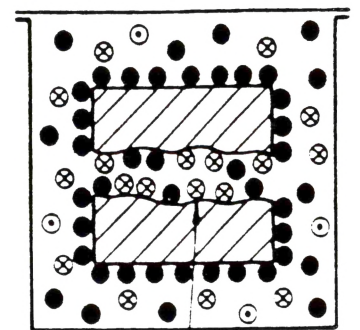
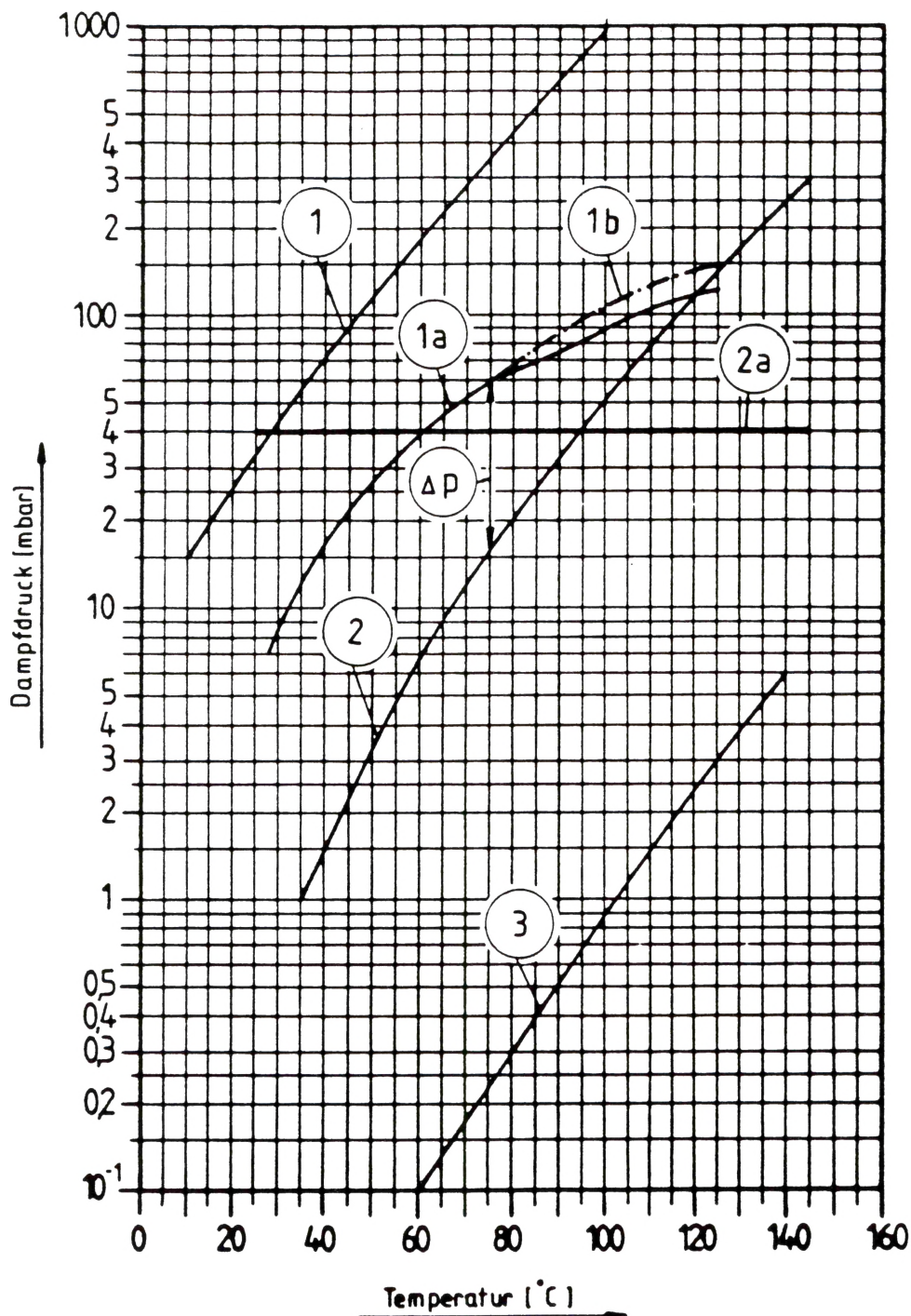


Diagramm D2

Diffusionskoeffizienten von ölfreiem Transformatoren-Pressspan geringer Dichte bei Vakuum von 0,13 - 13 mbar.



4

Kapillare in Isolation

- ⊗ Wasserdampfmoleküle
- Solventmoleküle
- ⊙ Luftmoleküle

Diagramm D3

### Theoretische Druckverhältnisse während Solventdampf-Aufheizphase

- ① Wasserdampfdruck
  - Theoretischer Wasserdampfdruck in der Isolation
  - Basis: Start 6%
- ①a Ende 0,8% Wassergehalt
- ①b Ende 1,0%
- ② Solventdampfdruck
- ②a Druck im Autoklav bei Zwischendrucksenkungsphasen
- ③ Oeldampfdruck
- Δp Theoretischer Trocknungs-Differenzdruck
- ④ Gaszusammensetzung während Aufheizphase im Autoklav

Diagramm D4

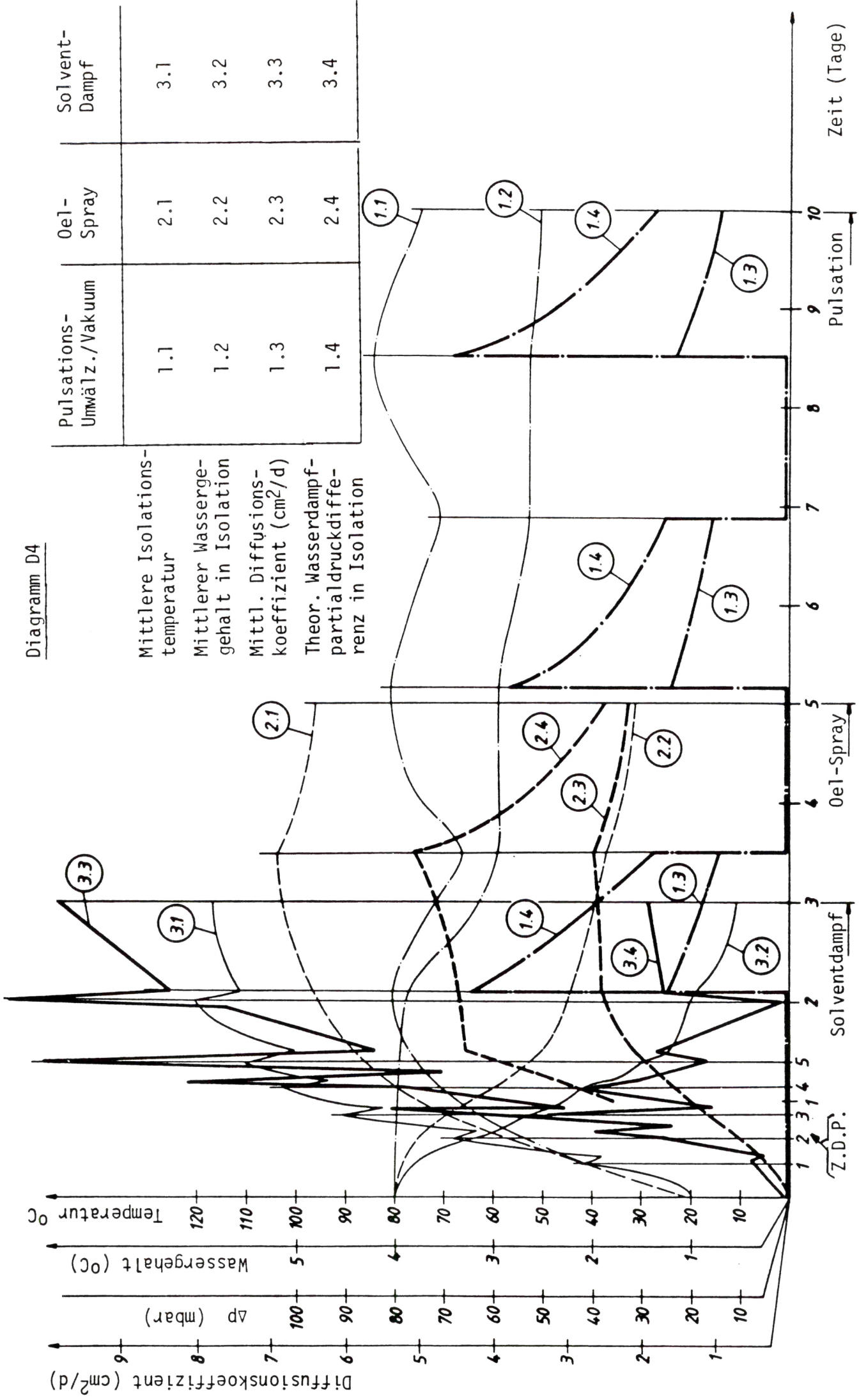
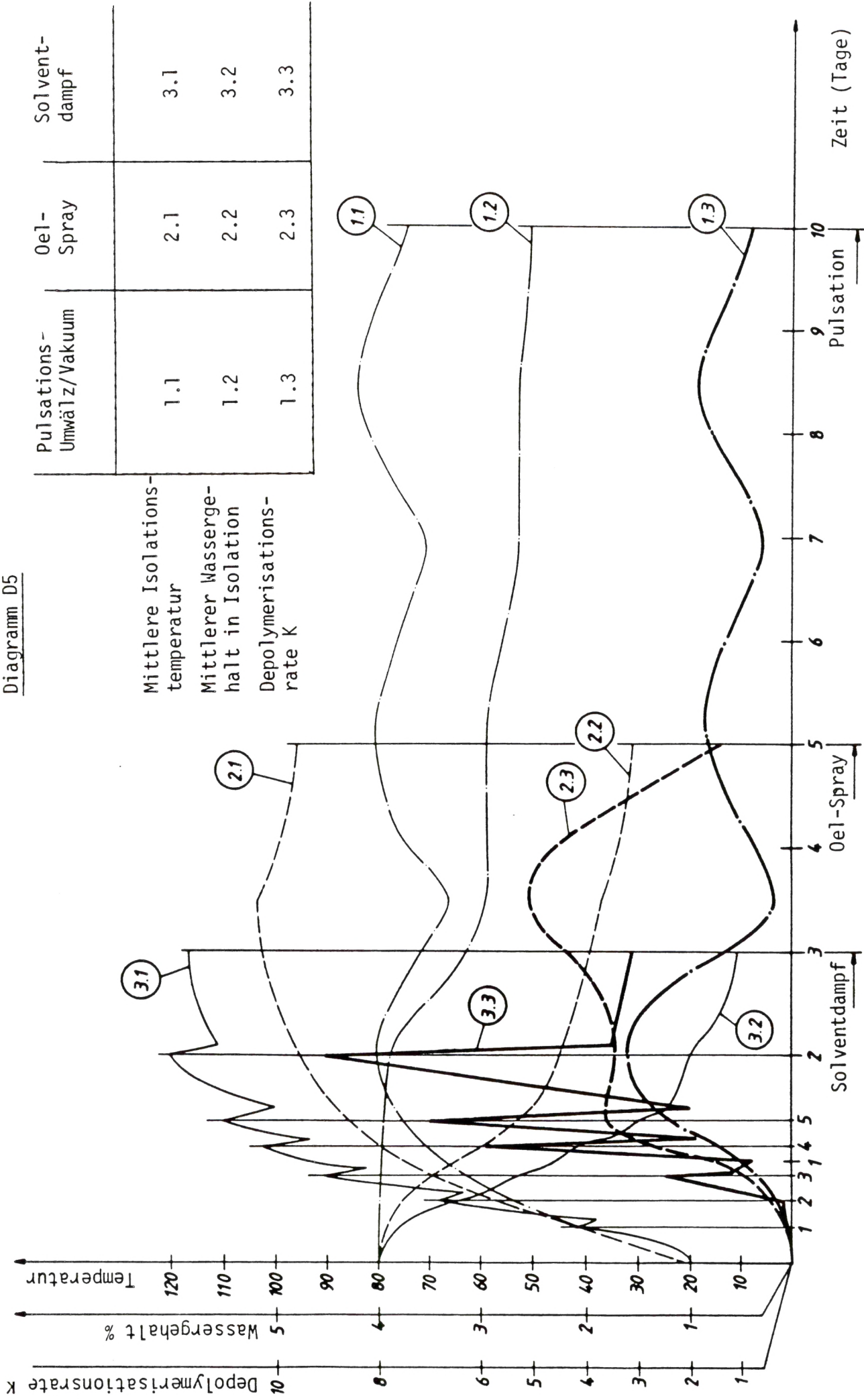


Diagramm D5



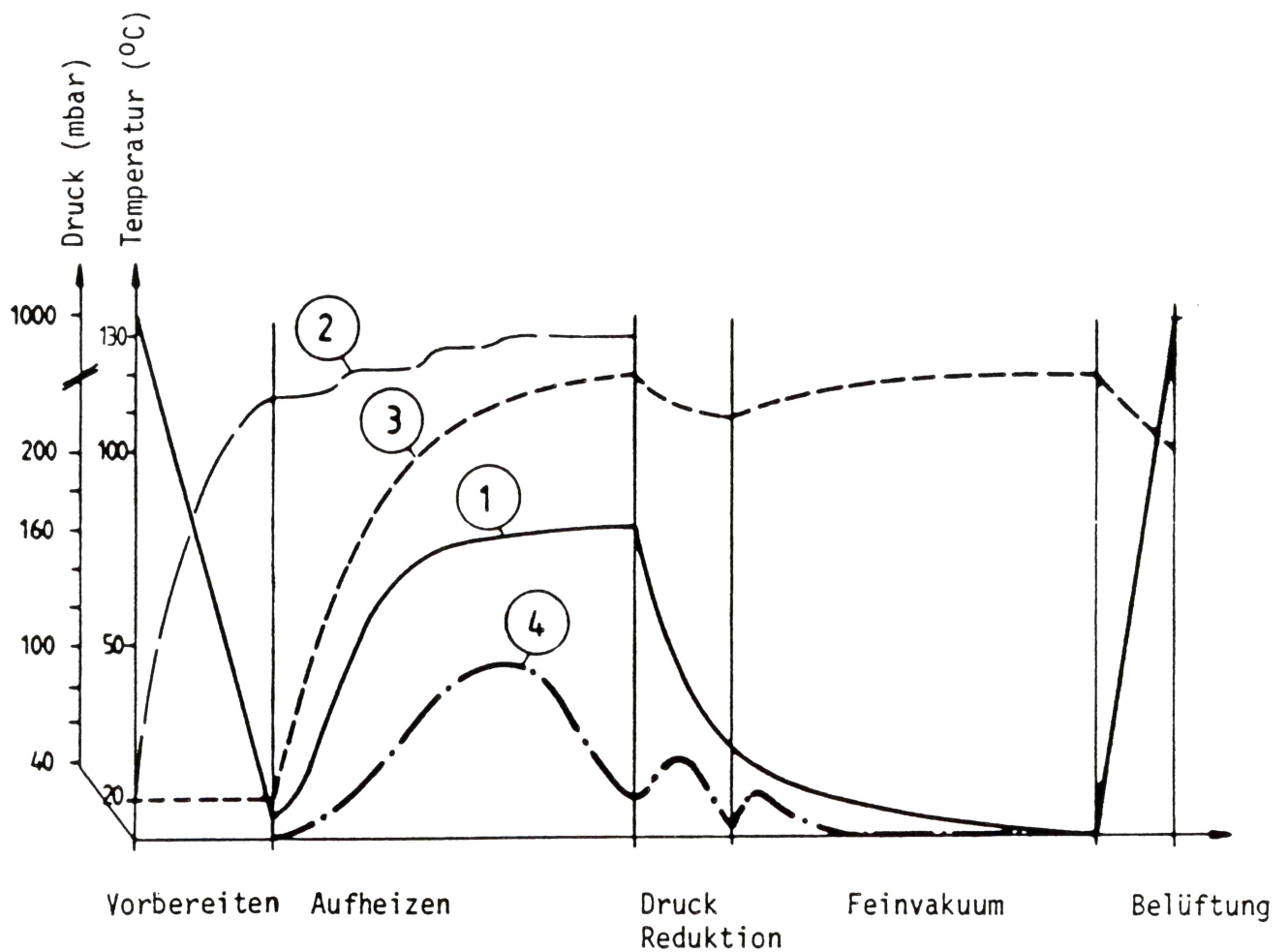
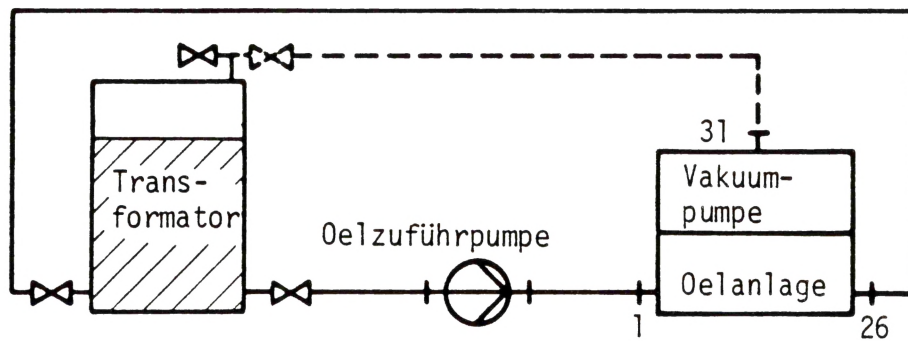


Diagramm D6

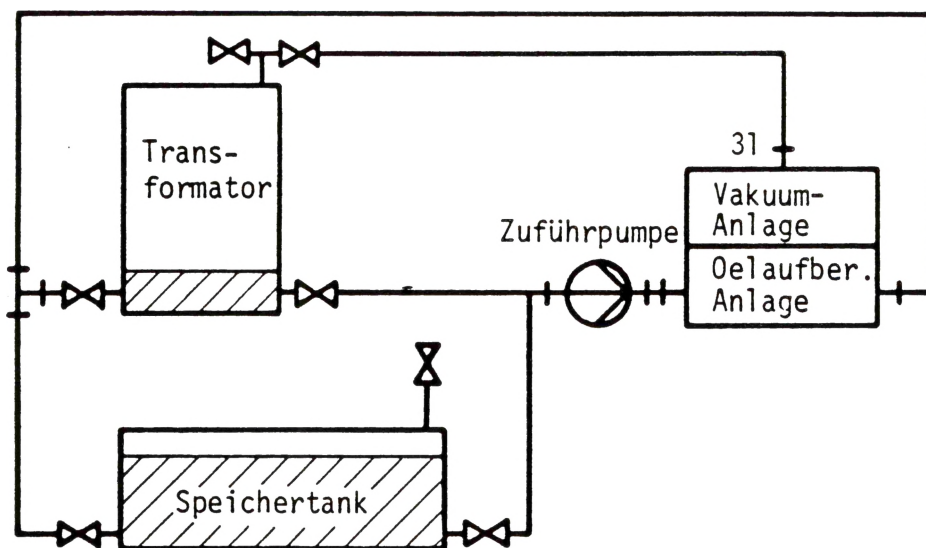
### Konventioneller Solventdampftrocknungsprozess

- ① Absoluter Druck im Autoklav
- ② Solventdampftemperatur
- ③ Temperatur Trocknungsobjekt
- ④ Wasserentzug (kg/h)



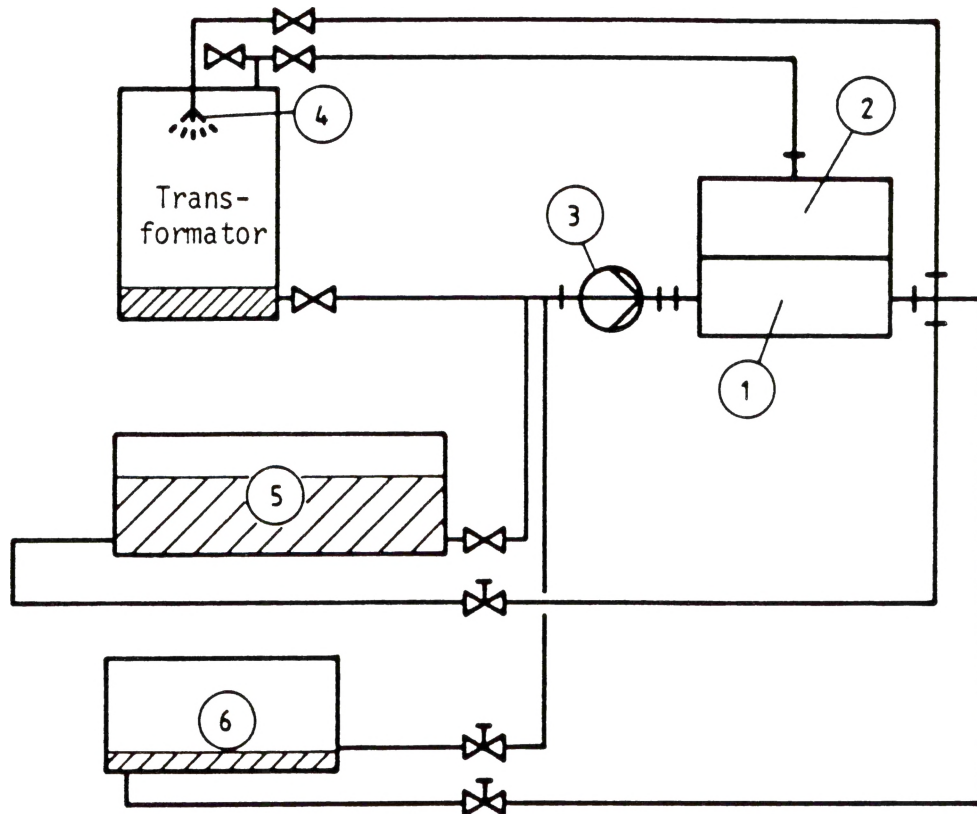
Schema S1

Anordnung für Öelumwälz-Verfahren



Schema S2

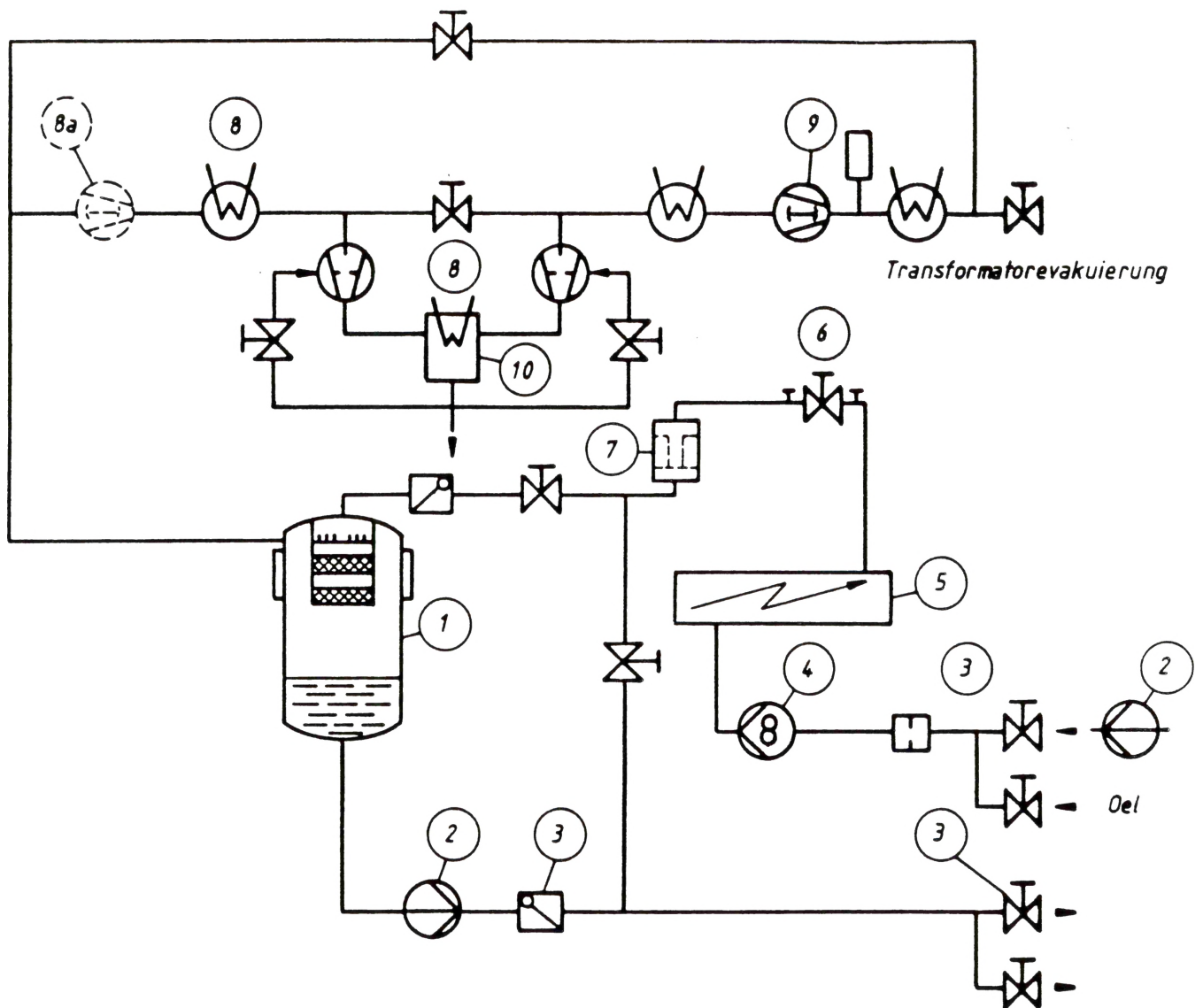
Anordnung für Pulsations-Öelumwälz/Vakuum-Verfahren



Schema S3

#### Anordnung für Öl-Spray-Trocknung

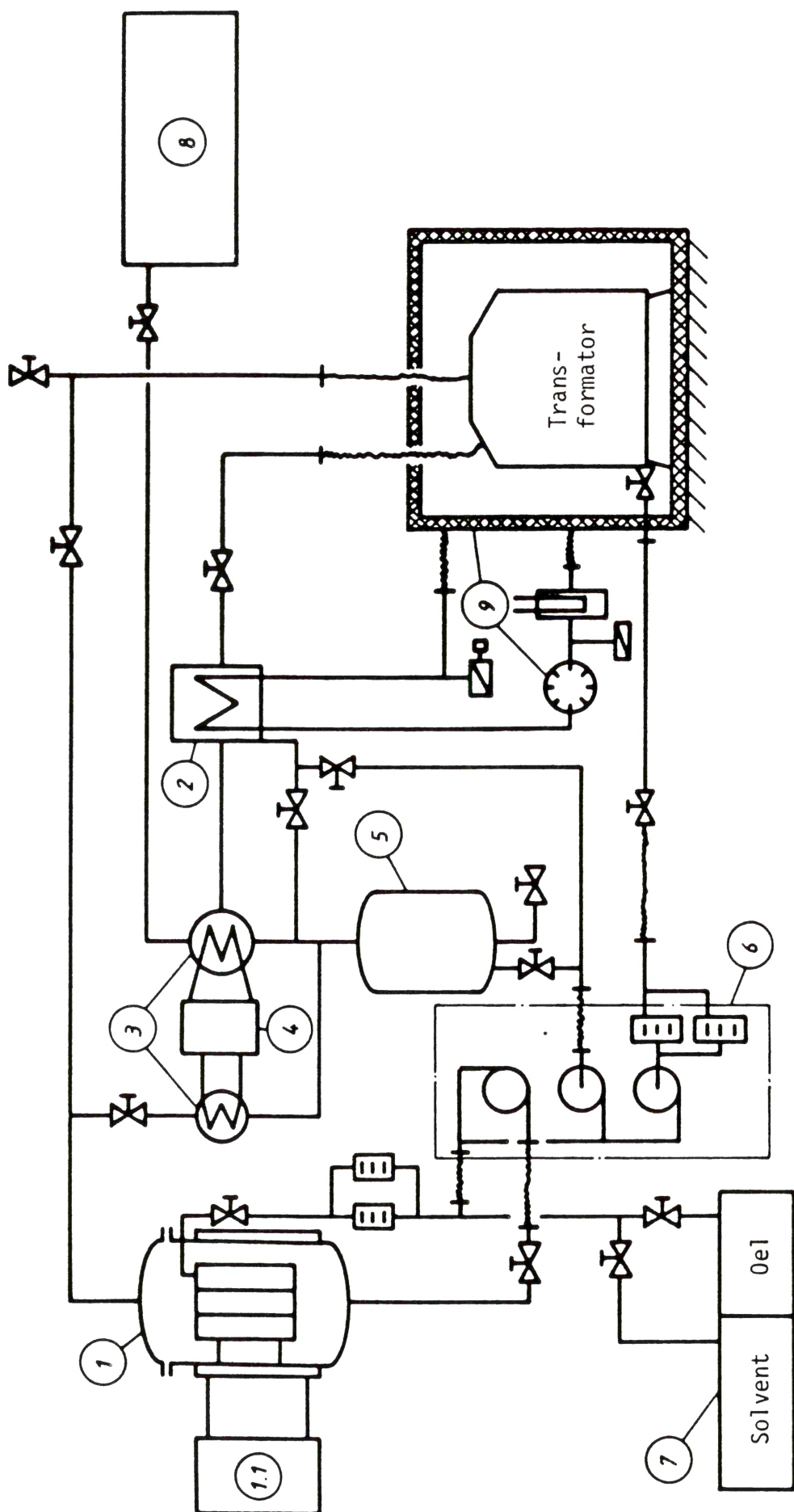
- ① Öl-Umwälz- und Aufbereitungsanlage
- ② Vakuumanlage für "Ölspray"
- ③ Öl-Zufuhrpumpe
- ④ Sprühdüsen
- ⑤ Tank für Transformatorenöl
- ⑥ Tank für "Spray"-Öl



Schema S4

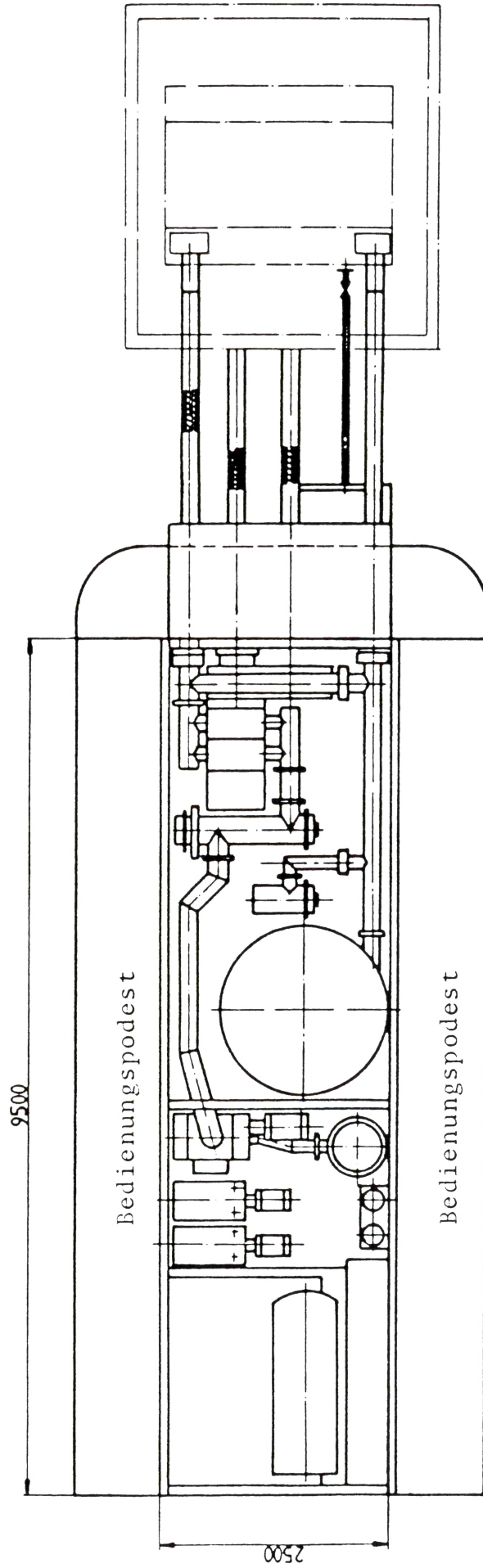
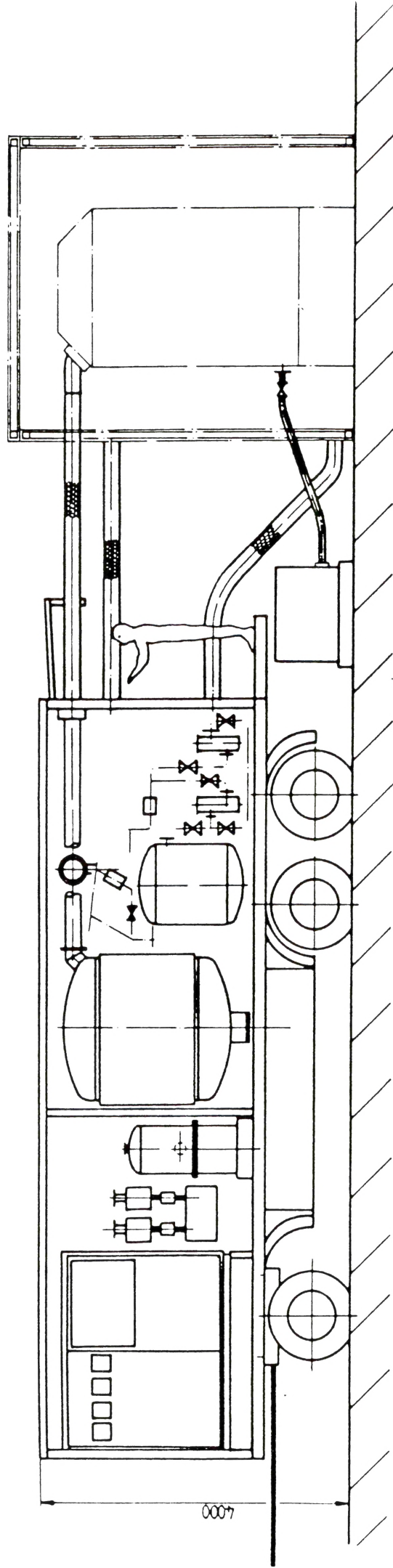
#### Aufbau einer modernen fahrbaren Öelaufbereitungs- und Trocknungsanlage

- |                            |  |
|----------------------------|--|
| ① Entgasungsstufe          | ⑦ Feinfilter   |
| ② Leckfreie Öelförderpumpe | ⑧ Vakuumanlage für Entgasungskessel                      |
| ③ Armaturen                | ⑧a Zusätzliche Rootspumpe                                |
| ④ Öelzuführpumpe           | ⑨ Vakuumanlage für Transformator-Trocknung               |
| ⑤ Öelerwärmer              | ⑩ Gekühlter Auspuffkondensator mit Gasballastrückführung |
| ⑥ Fulleranschluss          |  |

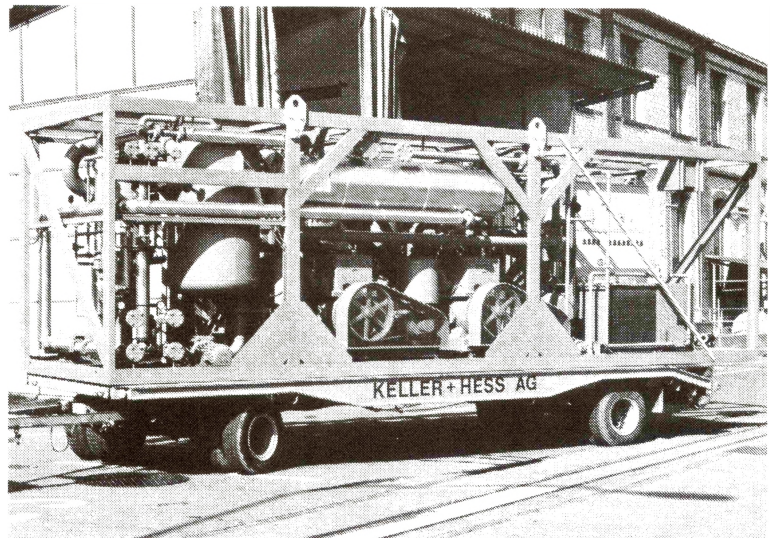


Schema S5. Fahrbare Solventdampfrocknungs-Anlage

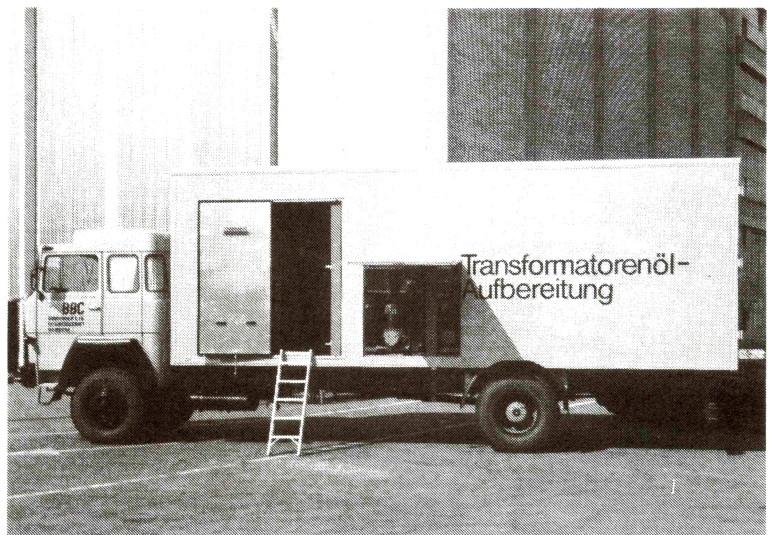
- |     |                     |   |                              |   |                                  |
|-----|---------------------|---|------------------------------|---|----------------------------------|
| ①   | Kaskaden-Verdampfer | ④ | Kälteanlage                  | ⑧ | Vakuumanlage                     |
| ①.1 | Heizanlage          | ⑤ | Trennbehälter                | ⑨ | Isolationshaus mit Luftumwälzung |
| ②   | Wärmerecuperator    | ⑥ | Solventförderanlage          |   |                                  |
| ③   | Kondensatoren       | ⑦ | Kombinierter Öl/Solvent-Tank |   |                                  |



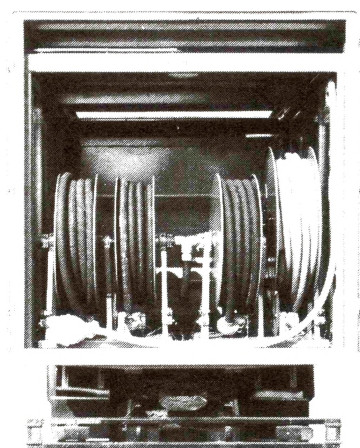
## Transformatorentrocknung vor Ort



1



2



3