



STROMVERSORGUNG VON MILLIONEN

Vakuum bei der Herstellung von Transformatoren, Isolatoren und Hochspannungsschaltern

Leistungstransformatoren werden zur Übertragung von Energie aus Kraftwerken oder öffentlichen Versorgungsnetzen an die Endverbraucher benötigt. Sie regeln die Stromspannungen und -ströme herauf oder herunter, um die Energie wirtschaftlich zu übertragen und die benötigten Spannungen bereit zu stellen. Bei der Herstellung dieser Transformatoren wird Vakuumtechnik an verschiedenen Stellen des Produktionsprozesses benötigt:

Bei der Trocknung der Wicklungen, bei der Entgasung des Transformatoren-Isolieröls und bei der Evakuierung des Transformator-tanks und Expansionsgefäßes vor und während der Ölbefüllung

Wicklungstrocknung

Ziel der Wicklungstrocknung ist es, Wasser, Gerb- und Essigsäure aus Papier und Holz sowie Polymere und Wachs aus der Papierisolierung zu entfernen. Bei Hochleistungstransformatoren beträgt die maximal zulässige Restfeuchtigkeit wegen möglicher Spannungsüberschläge maximal 0,1 – 0,3 Prozent. Dadurch soll vermieden werden, dass es zu möglichen Spannungsüberschlägen kommt. Somit werden die elektrischen Verluste verringert und der Isolationswiderstand verbessert sich. Im Vakuumbereich von $0,1 - 10^{-2}$ hPa ist der Isolationswiderstand auf einem für die Anwendung optimalen Niveau. Das für die Trocknung von Wicklungen benötigte Vakuum wird mithilfe von Kombinationen aus Wälzkolben- und Drehschieberpumpen erzeugt. Handelt es sich um eine saubere Anwendung, werden Trockenläufer als Vorpumpen für die Wälzkolbenpumpen verwendet. Für die Trocknung von Wick-

Produktionsschritt	Prozess	Benötigtes Vakuum
Wicklungstrocknung	VPD-Trocknung	$< 10^{-2}$ hPa
Konditionierung des Tanks und Ausgleichsgefäßes vor und während der Befüllung mit Isolieröl	Entfernung von Feuchtigkeit (Wasser) und Verunreinigungen durch Kondensation	$5 \cdot 10^{-2} - 10^{-3}$ hPa
Entgasung des Isolieröls	Entfernung von Feuchtigkeit/ Verunreinigung des Öls durch Auskondensieren	$< 0,5$ hPa

Tabelle 1: Vakuumtrocknungsprozesse in der Transformatorenproduktion

lungen stehen unterschiedliche Prinzipien zur Verfügung. Das effektivste ist der Vapour Phase Trocknungsprozess – kurz VPD.

Vapour-Phase-Trocknungsprozess (VPD)

Pfeiffer Vacuum entwickelte diesen Trocknungsprozess in den 1960er Jahren. Noch heute ist er der wirkungsvollste Prozess für die Trocknung von Wicklungen.

Der VPD nutzt die hohe thermische Leitfähigkeit des in die Trocknungskammer eingesprühten Kerosins oder Alkohols sowie die homogene Aufheizung des Isoliermaterials. Das injizierte Kerosin hat ähnliche chemische Eigenschaften wie das Isolieröl. Da der Prozess unter Vakuum abläuft, ist der Depolarisationsfaktor stark reduziert. Dies verlängert die Lebensdauer des Isolationsmaterials signifikant.

Kerosin verfügt über eine besondere Oberflächenspannung. Darüber hinaus ist es aufgrund seiner sehr geringen Dichte in der Lage, selbst in kleinste Spalte dringen zu können. Diese Eigenschaften führen dazu, dass der Trocknungsprozess um 50 – 60 Prozent schneller abläuft als beispielsweise die Trocknung mit Heißluft. So kann mithilfe von VPD die Trocknung der Wicklungen in wenigen Tagen bis maximal innerhalb einer Woche erfolgen. Dies erhöht den Durchsatz und bewirkt eine Kostenoptimierung durch Steigerung der Effektivität.

Ablauf eines Vapour Phase Trocknungsprozesses:

1. Abhängig von ihrer Größe werden entweder die gesamten Transformatoren oder lediglich die papierisolierten Kupferwicklungen mithilfe eines Schienensystems in die Trocknungskammer transportiert. Trocknungskammern werden heute bis zu einem Volumen von 1.000 m³ gebaut.
2. Um den Prozess der Entfeuchtung zu beschleunigen, wird die Temperatur in der Trocknungskammer auf etwa 105 bis 110 Grad Celsius gebracht.
3. Die notwendige Isolationstemperatur ist erreicht, sobald in der Kammer mindestens 105 Grad Celsius herrschen.
4. Das Kerosin wurde durch den JET-Verdampfer eingesprüht und durch das Heizmodul aufgeheizt. Das Vakuum-/Kondensator-Modul entfernt das Kerosin nun nach und nach mittels stetiger Druckabsenkung auf circa 20 hPa.
5. Sämtliche Verbindungen zum Verdampfer- und Kondensationsmodul werden geschlossen.
6. Um den Feinevakuierungsprozess zu starten, wird der Vakuumpumpstand eingeschaltet. Der Prozess ist beendet, sobald Vakuumbedingungen von $< 10^{-2}$ hPa erreicht wurden.

7. Die maximal zulässige Restfeuchte beträgt 0,3 Prozent. Im Fall von High-End-Transformatoren liegt sie bei 0,1 Prozent. Der exakte Wert der vorhandenen Restfeuchte wird am Auspuff der Vakuumpumpen durch Taupunktmesseinrichtungen bestimmt.
8. Unter Vakuum wird entgastes Isolieröl in den Tank gefüllt. Hier ist eine Überlaufschutzeinrichtung essenziell, die die Vakuumpumpen gegen Flüssigkeitsschlag schützt. Nur mit dieser kann verhindert werden, dass kein Isolieröl in die laufenden Vakuumpumpen eintritt. Insbesondere die Wälzkolbenpumpen werden dadurch vor einer möglichen Zerstörung bewahrt.
9. Das Kerosin wird während des Feinvakuierungsprozesses in einem Destillationsmodul aufbereitet und zur weiteren Verwendung in einem separaten Sammel tank gelagert.

Evakuierung des Transformatortanks

Bei der Herstellung von Transformatoren darf keinerlei Feuchtigkeit wie zum Beispiel Wasser oder Verunreinigungen durch Kondensation verbleiben. Daher müssen diese gründlich entfernt werden. Dazu sind mobile Vakuumsysteme notwendig, die exakt auf die Anforderungen der spezifischen Anwendung abgestimmt sind. Bei der Evakuierung von Transformatortanks existieren exakt definierte Standards, die zu beachten sind: so ist zum Beispiel der Evakuierungsanschluss am Transformatortank standardmäßig 80 Millimeter groß. Diese relativ kleine Öffnung führt bei < 1 hPa zu signifikanten Leitwertverlusten. So wird das Saugvermögen des eingesetzten Vakuumpumpstands deutlich reduziert. Parallel dazu wirkt sich dieser Standard auch nachteilig auf die Auspumpzeit aus: Sie wird deutlich verlängert, was wiederum den Produktionsdurchsatz reduziert. Auch größere Vakuumpumpen führen hier zu keiner Verbesserung – sie erhöhen lediglich die Produktionskosten.

Die eingeschränkte Nennweite führt dazu, dass die mobile Vakuumeinheit in geringstmöglicher Entfernung zu der 80 Millimeter großen Öffnung angebracht werden muss. Mit kurzen Vakuumsaugschläuchen können so die Leitwertverluste begrenzt werden. Normalerweise sind diese Schläuche zwischen vier und fünf Meter lang.

Restfeuchtigkeit bestimmen

Die Restfeuchtigkeit ist durch Taupunktmessgeräte am Auspuff der Vakuumeinheit oder durch Vakuumtransmitter messbar. Für die Vakuummessung sollten ausschließlich kapazitive Transmitter verwendet werden. Diese verfügen über eine hohe Messgenauigkeit, sind korrosionsbeständig und führen die Messungen gasartenunabhängig durch. Der Wert der Restfeuch-

tigkeit wird durch das Vakuum lediglich indiziert. Daher ist es wichtig, dass das Vakuummessgerät sehr genau ist. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Vorgaben für die maximal zulässige Restfeuchtigkeit erfüllt werden. Kostengünstige Pirani-Vakuumtransmitter erreichen im niedrigen Messbereich lediglich eine Messgenauigkeit von nur +/- 15 % und bei > 1 hPa kann die Abweichung 30 Prozent oder mehr betragen.

Isolierölaufbereitung

Auch das Isolieröl muss frei von jeglicher Feuchtigkeit und Verunreinigung sein, um innere Spannungsüberschläge zu vermeiden. Dazu wird ein genauer Reinheitsgrad des Öls definiert, der erreicht werden muss. Dies geschieht, indem das Isolieröl einem Entgasungsprozess unterzogen wird.

Während dieses Entgasungsprozesses werden Feuchtigkeit, Luft und andere Verunreinigungen aus dem Isolieröl entfernt, bevor es in den Transformator gefüllt wird. Dafür sind Vakuumbedingungen von < 1 hPa notwendig. Hierzu werden dreistufige Wälzkolben-/Drehschieberpumpstände (Saugvermögenswerte: 1000/500 m³/h bei Wälzkolbenpumpen; 100–200 m³/h bei einstufigen Drehschieberpumpen) oder zweistufige Drehschieberpumpen mit 250 m³/h Saugvermögen und Zwischenkondensator eingesetzt.

Hochspannungsschalter und Isolatoren

Schwefelhexafluorid (SF₆) – ein geruchloses, inertes und unkritisches Gas – wird in Mittelspannungs- und Hochspannungsschaltern und -anlagen (GIS) sowie gasisolierten Leitungssystemen (GIP) für komplett gekapselte Anlagen im Spannungsbereich von 6 bis 1000 KV als Isoliergas eingesetzt. Außerdem wird das Gas auch für das Ausblasen des Lichtbogens beim Schalten von Hochspannungsschaltern verwendet.



Bild 1: Trocknungspumpstand von Pfeiffer Vacuum

Im Vergleich zu Luft und Stickstoff verfügt Schwefelhexafluorid über dreifach höhere Unterbrechungseigenschaften. Dank dieser Eigenschaften und der niedrigen dielektrischen Verluste ist SF₆ optimal für die genannten Anwendungen geeignet. Um die Isoliereigenschaften zu erhalten, steht das Gas unter einem Druck von 5 bis 10 bar. Dieser erhöhte Druck dient der Verringerung der freien Weglänge der Elektronen. Durch diese Reduktion soll verhindert werden, dass die Elektronen zu stark beschleunigen und nicht frühzeitig mit den SF₆ Molekülen kollidieren.

INFOBOX

Leitwertverluste beeinflussen die Pumpstandsleistung

- Mit der blauen Kurve wird das Saugvermögen eines dreistufigen Pumpstands bei direktem Anschluss an die Trocknungskammer dargestellt. Diese Variante ist in der Praxis jedoch nicht umsetzbar.
- Mit der roten Kurve wird der Einfluss des 80 Millimeter großen Saugstutzens auf das Saugvermögen des dreistufigen Pumpstands gezeigt. Liegen Vakuumbedingungen von $5 \cdot 10^{-3}$ vor, so beträgt das Saugvermögen nur noch 80 m³/h bei installierter Leistung von 3,200 m³/h
- Der Saugvermögensunterschied ist durch die Leitwertverluste aufgrund der kleinen Nennweite der Ansaugleitung im Druckbereich < 1 hPa begründet
- Eine deutliche Verbesserung des Saugvermögens bei gleichzeitiger Reduktion der Auspendzeit könnte durch eine Änderung des Standards auf eine Nennweite von beispielsweise 100 Millimeter erreicht werden.

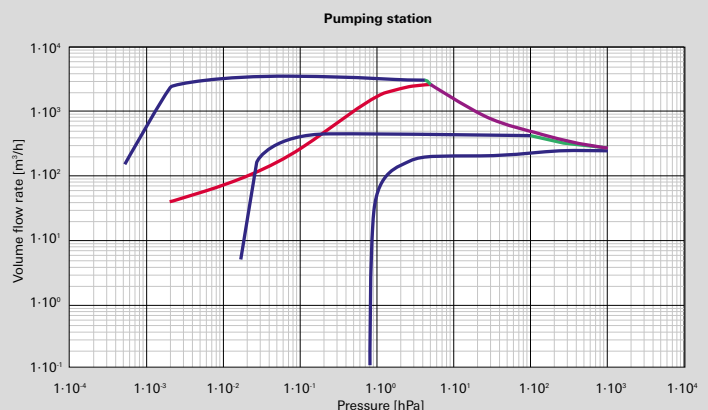


Tabelle 2: Einfluss der Leitwertverluste auf die Pumpstandsleistung



Bild 2: Die Drehschieberpumpen der DuoLine von Pfeiffer Vacuum decken den Saugvermögensbereich von 1,25 bis 1.920 m³/h ab

Vor der Befüllung von Hochspannungsschaltern mit SF₆-Isoliertgas werden diese ebenfalls in Vakuumkammern getrocknet. Für diese Trocknungs- und Befüllprozesse sind genau wie bei denen der Transformatoren Vakuumbedingungen von $< 10^{-2}$ hPa erforderlich.

Vor-Ort-Wartung im Feldeinsatz

Für die einwandfreie und sichere Funktion von Transformatoren, Hochspannungsschaltern und Isolatoren ist eine regelmäßige Wartung unbedingt notwendig. Durch Undichtigkeiten tritt nach und nach Feuchtigkeit ein, die innere Spannungsüberschläge hervorrufen kann. Auf Basis eines definierten Wartungsplans müssen die Tanks geleert, auf Leckagen untersucht und anschließend wieder mit Isolieröl oder SF₆-Gas befüllt werden.

Für die vor-Ort-Wartung werden die Vakuumpumpen und Füllrichtungen auf Lastkraftwagen platziert. Die Stromversorgung erfolgt mittels Dieselgeneratoren.

Dichtheitsprüfung zur Qualitätssicherung

Ob im Fertigungsprozess oder bei der Wartung vor Ort – Leckageprüfungen sind zur Qualitätssicherung unverzichtbar. Mit der Druckanstiegsmethode können nur grobe Leckagen mit einer Leckrate von 10^{-1} hPa m³/s gefunden werden. Wird eine höhere Dichtigkeit verlangt, sind Helium-Lecksucher notwendig. Diese messen Leckagen zuverlässig und genau. Für die Anwendung bei der Transformatorenproduktion sind mobile, tragbare Lecksucher mit einem Gewicht von bis zu 25 Kilogramm interessant, da diese auch im Feld eingesetzt werden können.

Drehschieberpumpe oder Trockenläufer als Vorpumpe?

Trockenläufer werden immer beliebter. Doch für Anwendungen wie die VPD-Transformatoren-/Wicklungstrocknung sind Drehschieberpumpen dank ihrer technischen Eigenschaften optimal. Die Ölbetriebstemperatur beträgt bei Drehschieberpumpen mit geöffnetem Gasballastventil 80–85 Grad Celsius. Im Vergleich dazu erreichen Trockenläufer aufgrund ihrer Wärmeentwicklung durch die innere Verdichtung Gastemperaturen zwischen 150 und 180 Grad Celsius.

Treten im VPD-Prozess Polymere und Wachs auf, verbrennen sie beim Einsatz von Trockenläufern auf den heißen Rotoren.



Bild 3: Wälzkolbenpumpe der OktaLine mit Magnetkupplung von Pfeiffer Vacuum



Bild 4: CombiLine Wälzkolbenpumpe von Pfeiffer Vacuum

Dort bilden sie einen schwarzen Belag, der dafür sorgt, dass die Pumpen nach dem Abschalten nicht mehr anlaufen und komplett gereinigt werden müssen.

Beim Einsatz von Drehschieberpumpen bleiben die Polymere und das flüssige Wachs hingegen im Betriebsmittel und werden beim Ölwechsel mit abgelassen. So kann die Pumpe nach dem Befüllen mit frischem Öl sofort wieder eingesetzt werden. Demnach ist lediglich die Entsorgung des Öls eine notwendige und zu berücksichtigende Maßnahme.

Lösungen von Pfeiffer Vacuum

Sowohl für die Erzeugung der benötigten Vakuumbedingungen als auch für die Durchführung der Dichtheitsprüfungen mit mobilen Lecksuchgeräten bietet Pfeiffer Vacuum die passende Lösung. Das umfassende Portfolio enthält die



Bild 5: Tragbarer Lecksucher ASM 310 von Pfeiffer Vacuum

für die Produktionsprozesse von Transformatoren und Hochspannungsschaltern geeigneten, folgenden Lösungen:

- Ein- und zweistufige Drehschieberpumpen im Saugvermögensbereich von 1,25 bis 1.920 m³/h mit geringen Abmessungen
- Flexibel auf die spezifische Anwendung anpassbare Wälzkolbenpumpen mit hohem Kompressionsverhältnis und geringen Betriebskosten
- Mobile Lecksucher mit einem Maximalgewicht von 25 Kilogramm, die leistungsstark und zuverlässig jede Leckage finden.

Unsere Experten stehen Ihnen gern bei der Auslegung einer für Ihre individuelle Anwendung optimalen Vakuumlösung zur Seite. Sprechen Sie uns an!



Bild 6: Portabler Lecksucher MiniTest von Pfeiffer Vacuum und Transportkoffer

VAKUÜMLÖSUNGEN AUS EINER HAND

Pfeiffer Vacuum steht weltweit für innovative und individuelle Vakuümlösungen, für technologische Perfektion, kompetente Beratung und zuverlässigen Service.

KOMPLETTES PRODUKTSORTIMENT

Vom einzelnen Bauteil bis hin zum komplexen System:

Wir verfügen als einziger Anbieter von Vakuumtechnik über ein komplettes Produktsortiment.

KOMPETENZ IN THEORIE UND PRAXIS

Nutzen Sie unser Know-how und unsere Schulungsangebote!

Wir unterstützen Sie bei der Anlagenplanung und bieten erstklassigen Vor-Ort-Service weltweit.

Sie suchen eine perfekte
Vakuümlösung?
Sprechen Sie uns an:

Pfeiffer Vacuum GmbH
Headquarters · Germany
T +49 6441 802-0

www.pfeiffer-vacuum.com