1 Einleitung

Dieses Fachbuch vermittelt einen praxisorientierten Überblick über den Elektromaschinenbau im 21. Jahrhundert – mit besonderem Fokus auf die Einzelfertigung sowie die Instandsetzung großer elektrischer Maschinen im industriellen Maßstab. Es konzentriert sich auf Maschinen, wie sie beispielsweise in Kraftwerken, Industrieanlagen oder Infrastrukturprojekten eingesetzt werden: Generatoren, Transformatoren und große Elektromotoren.

Im Mittelpunkt steht dabei ein typischer Kreislauf, wie er in der Praxis regelmäßig auftritt: Entweder wird eine elektrische Maschine neu gefertigt, oder eine bestehende, häufig viele Jahre im Einsatz befindliche Anlage fällt aus und muss instandgesetzt oder sogar umfassend überholt werden. In beiden Fällen werden besondere Anforderungen an die beteiligten Fachkräfte gestellt.

Das Buch richtet sich an Auszubildende, Facharbeiter, Meister, Techniker und Ingenieure, die in der Fertigung oder Reparatur solcher Maschinen tätig sind oder sich für diese Themen interessieren. Ziel ist es, ein grundlegendes Verständnis für die technologischen Zusammenhänge zu vermitteln und einen anwendungsbezogenen Zugang zu aktuellen Entwicklungen in der Fertigungspraxis zu eröffnen.

Auf eine vertiefte Darstellung mathematischer Auslegungen mechanischer Komponenten oder magnetischer Kreise wird bewusst verzichtet. Der Schwerpunkt liegt stattdessen auf der technologischen Umsetzung und den spezifischen Fertigungsmethoden zentraler Bauteile im industriellen Umfeld.

Das Buch ist entlang des typischen Fertigungs- und Instandsetzungsprozesses aufgebaut: von der Demontage und Befundung über die Fertigung einzelner Komponenten bis hin zur Montage und abschließenden Prüfung. Jeder Abschnitt beleuchtet typische Arbeitsschritte, eingesetzte Technologien und praktische Herausforderungen aus dem Werkstattalltag. Zahlreiche Beispiele aus der Praxis sowie technische Hinweise erleichtern insbesondere Neueinsteigern den Zugang – ohne dabei die Anforderungen erfahrener Fachkräfte aus dem Blick zu verlieren.

Die dargestellten Inhalte spiegeln die Praxis in der Fertigung und Instandsetzung großer elektrischer Maschinen wider – von Generatoren, die seit Jahrzehnten im Einsatz stehen, bis hin zu aktuellen Fertigungsprojekten mit höchsten technischen Anforderungen.

Die beiden folgenden Abschnitte fassen diesen Kreislauf zunächst in Kurzform zusammen – mit einem Überblick über Demontage, Montage und Auslieferung an den Kunden. Ab Kapitel 2 werden die einzelnen Arbeitsschritte und Komponenten dann detailliert behandelt.

1.1 Demontage

Am Anfang jeder Instandsetzung steht ein konkreter Anlass beim Kunden: Eine Maschine fällt plötzlich aus, erreicht nicht mehr die volle Leistung oder zeigt erste Anzeichen von Verschleiß. Häufig handelt es sich dabei um Generatoren oder Motoren, die in Kraftwerken, Industrieanlagen oder im Bahnbereich im Dauereinsatz stehen. Der Ausfall führt meist zu erheblichen Einschränkungen im laufenden Betrieb – teils mit hohen wirtschaftlichen Folgen. Die betroffenen Unternehmen sind in solchen Fällen auf eine möglichst schnelle und zuverlässige Reparatur angewiesen, um Stillstandzeiten zu minimieren und die Betriebsfähigkeit ihrer Anlagen wiederherzustellen. Jeder Tag, an dem die Maschine nicht zur Verfügung steht, kann Produktionsausfälle, Versorgungsengpässe oder Vertragsstrafen nach sich ziehen.

Besonders vorteilhaft erweist sich in solchen Situationen ein hoher Grad an vertikaler Diversifikation auf Seiten des Dienstleisters: Wenn möglichst viele Fertigungs- und Bearbeitungsschritte im eigenen Haus durchgeführt werden können – vom Drahtziehen über die Wicklung bis hin zur mechanischen Bearbeitung –, lassen sich Abläufe effizient koordinieren, Durchlaufzeiten verkürzen und externe Abhängigkeiten minimieren.

In allen Szenarien beginnt der Werkstattprozess mit der Anlieferung der Maschine und einer umfassenden technischen Befundung.

Zunächst erfolgt eine optische Begutachtung sowie die Erfassung aller relevanten technischen Daten. Dazu zählen unter anderem: Bemessungsleistung, Bemessungsspannung, Bemessungsdrehzahl und weitere Kennwerte. Ergänzend wird geprüft, ob besondere Merkmale oder Anbauteile vorhanden sind, beispielsweise Kupplungen, Riemenscheiben, Ritzel oder spezielle Ausführungen auf der Antriebsseite. Auch sichtbare Schäden werden dokumentiert.

Im Anschluss beginnt die Demontage der Maschine. Je nach Größe und Masse kommen dafür spezielle Werkzeuge und Hebezeuge zum Einsatz.

Die Demontage erfolgt schrittweise: Zuerst werden Lüfterhaube und Lüfter entfernt, anschließend die Lagerschilde. Das Ausfahren des Läufers erfordert besondere Sorgfalt und eine spezielle Technologie, um Beschädigungen an der

Statorwicklung oder am Blechpaket zu vermeiden. Sind alle relevanten Baugruppen demontiert, erfolgt eine Maßkontrolle der mechanisch bearbeiteten Teile. Die Ergebnisse werden in einem Protokoll festgehalten. Die auf der Welle befindlichen Lager werden mit geeigneten Abziehvorrichtungen entfernt. Die elektrische Prüfung des magnetischen Kreises und der Wicklungen erfolgt in der Regel erst nach dem Wasserreinigungsprozess.

Die Prüfungen orientieren sich an den geltenden Vorschriften für in Betrieb befindliche Maschinen oder an spezifischen Kundenanforderungen. Aus der Befundung ergeben sich die Aufgaben für die jeweiligen Fertigungsabteilungen – darunter Pyrolyse und Neuwicklung, mechanische Bearbeitung, Blechpaketfertigung, Neulagerung oder das dynamische Wuchten des Läufers.

Grundsätzlich werden sämtliche Wicklungen sowie alle mechanischen Teile im Innenbereich mit einem Feuchtigkeitsschutzlack versehen. Nach Abschluss aller Instandsetzungsarbeiten erfolgt die fachgerechte Montage der Maschine.

1.2 Montage

Sind alle Bauteile aufgearbeitet bzw. neu gefertigt und mit Oberflächenschutzlack versehen, beginnt die Endmontage der Maschine. Zunächst werden – sofern keine Gleitlager verbaut sind – neue Wälzlager auf die vorbereiteten Lagersitze der Welle aufgezogen. Um eine gleichmäßige Erwärmung und damit eine kontrollierte Ausdehnung zu gewährleisten, erfolgt das Aufziehen durch induktives Erwärmen der Lager. Handelt es sich um eine Gleitlagermaschine, so sind die Lagerflächen sorgfältig zu prüfen. Es dürfen keinerlei Rillen oder Beschädigungen an den Laufflächen vorhanden sein.

Anschließend wird der Läufer vorsichtig in den Stator eingeführt. Die Lagersitzflächen der Lagerschilde werden ebenfalls thermisch behandelt, bevor sie auf die Lager des Läufers aufgezogen und anschließend mit dem Stator verschraubt werden. Erst danach werden die Lager mit geeignetem Lagerfett befüllt und die Lagerdeckel montiert.

Es folgt die elektrische Prüfung der Maschine gemäß den geltenden Normen – in der Regel nach DIN EN 60204-1 (VDE 0113-1) – sowie ein Probelauf. Besonderes Augenmerk gilt dabei den Schwingungsergebnissen, da diese Rückschlüsse auf die Schwinggüte und die Qualität des Lagereinbaus ermöglichen.

Zum Abschluss erhält die Maschine die vom Kunden gewünschte Farbgebung und ist damit bereit für die Auslieferung oder Inbetriebnahme.

2 Pyrolyse

Die Pyrolyse ist ein bewährtes Verfahren zur Entfernung der Isolierstoffe, mit denen die Wicklungen elektrischer Maschinen imprägniert sind. Dabei wird das Imprägniergut (Harz oder Lack) der defekten Wicklung thermisch zersetzt, ohne dass es zu offener Flammenbildung kommt. Im Vergleich zu mechanischen oder chemischen Methoden bietet die Pyrolyse den Vorteil, dass Stator oder Rotor thermisch schonend behandelt werden – das Blechpaket bleibt formstabil, Passungen bleiben erhalten.

Das Verfahren kommt insbesondere bei lack- oder harzgetränkten Wicklungen zum Einsatz und dient als Vorbereitung für die Neuwicklung, sofern die betreffenden Bauteile die thermischen Anforderungen für eine Pyrolysebehandlung erfüllen.

2.1 Vorüberlegungen

Unabhängig von Bemessungsspannung, Bemessungsleistung oder Wicklungsausführung sind elektrische Maschinen in der Regel mit Lack oder Harz imprägniert. Diese Imprägnierung verleiht den Wicklungen eine hohe mechanische und elektrische Festigkeit, thermische Stabilität sowie wirksamen Schutz vor Feuchtigkeit. Dadurch wird eine lange Lebensdauer auch bei wechselnden Belastungszyklen gewährleistet.

Kommt es jedoch zu einem Ausfall, stellt sich die Frage: Ist eine Reparatur wirtschaftlich sinnvoll oder sollte die Maschine durch eine neue ersetzt werden? Dabei spielen sowohl das Alter als auch der Wirkungsgrad der Maschine eine Rolle – moderne Anforderungen gemäß europäischer Normen bevorzugen in vielen Fällen hocheffiziente Antriebe.

Fällt die Entscheidung zugunsten einer Instandsetzung, stehen die zuvor genannten Vorteile der Imprägnierung der Wicklung plötzlich im Weg. Denn die Entfernung des festen, oft hart eingebrannten Isoliermaterials stellt eine große Herausforderung dar – insbesondere, ohne das empfindliche Blechpaket zu beschädigen.

Hier kommt das Pyrolyseverfahren zum Einsatz (aus dem Griechischen: *pyr* = Feuer, *lysis* = Auflösung). Es ermöglicht die thermische Zersetzung der Wicklung, ohne direkte Flammenwirkung, und schützt so die Struktur des Blechpakets (**Bild 2.1**).

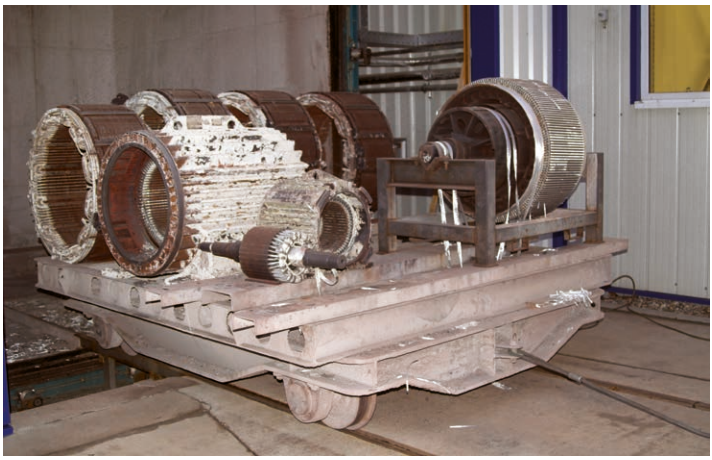

Bild 2.1 Blechpaket mit Wicklung nach der Pyrolyse

Die Art der Wicklungsentfernung hängt von der Gestaltung der Blechpaketnutenform (offen, halboffen, geschlossen) ab:

- Offene Nuten: Die Nutenverschlusskeile werden entfernt, und die Wicklung wird in Richtung der Nutöffnung herausgehebelt.
- Halboffene Nuten: Die Wickeldrähte werden vorsichtig herausgezogen oder durch den Nutschlitz ausgefädelt.
- Geschlossene Nuten (ohne Schlitz): Der Wickelkopf wird auf einer Seite mit einem Drucklufthammer oder einer Kreissäge entfernt, anschließend wird die Wicklung herausgezogen.
- Polräder: Die Wicklung wird abgetrennt oder abgewickelt.

Nach dem Entfernen der Wicklung müssen Rückstände wie Lack-, Isolations- und Aschepartikel gründlich entfernt werden. Dies geschieht in einer Strahlanlage, die mit Walnussgranulat (oder anderem nicht leitenden Material arbeitet) – ein abrasives, aber materialschonendes Strahlmittel. Es beseitigt alle Rückstände, ohne das Blechpaket zu beschädigen. Nach dem Strahlen werden sämtliche Partikel, inklusive des Granulats, abgesaugt.

Als letzter Schritt erfolgt die Grundierung des Maschinenkörpers. Sie dient einerseits dem Korrosionsschutz, andererseits als saubere und haftfähige Oberfläche für die nachfolgende Neuwicklung.

Nicht für die Pyrolyse geeignet sind:

- Blechpakete mit Papierisolation
- Materialien, die bei 400 °C Schaden nehmen (z. B. Aluminium)
- Maschinen mit Schleifringkörpern oder Kommutatoren
- Schweißkonstruktionen mit inneren Spannungen

2.2 Praktischer Prozess

Der Pyrolyseprozess findet in einer speziell geregelten Ofenkammer statt (**Bild 2.2**). Dabei wird das zu behandelnde Bauteil über einen Zeitraum von etwa 25 Stunden mit heißer Luft auf rund 400 °C erwärmt. Der Sauerstoffgehalt wird dabei so niedrig gehalten, dass keine offene Verbrennung entsteht – das Material wird lediglich thermisch ausgeschwelt. Als Nebenprodukt entstehen sogenannte Pyrolysegase.

Bild 2.2 Großer Stator mit Wicklung nach dem Pyrolyseprozess

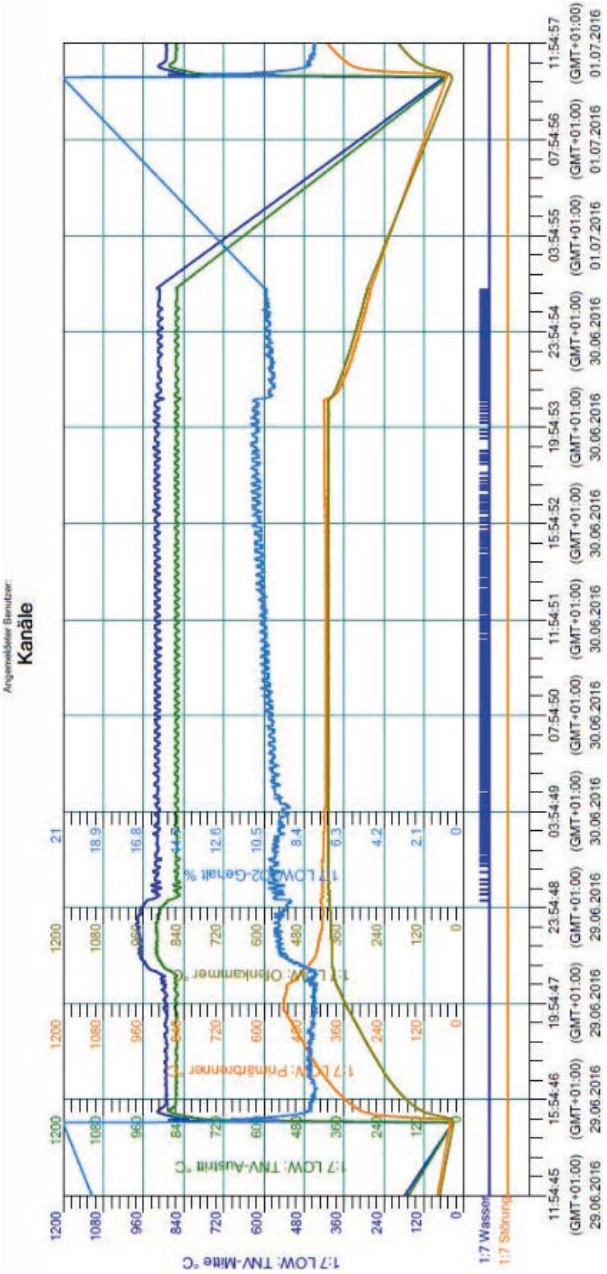

Bild 2.3 Pyrolyseprotokoll

Diese Gase werden in einem nachgeschalteten Nachverbrenner bei etwa 850 °C vollständig oxidiert und in ungiftige Verbrennungsgase umgewandelt, die kontrolliert in die Atmosphäre abgegeben werden können. Der gesamte Prozess wird dokumentiert und kann dem Kunden als PDF oder in schriftlicher Form zur Verfügung gestellt werden (**Bild 2.3**).

Wicklung entfernen

Nach der Pyrolyse werden die verbrannten Wicklungsreste mechanisch entfernt. Die Art der Entnahme richtet sich – wie zuvor beschrieben – nach der Bauform der Nuten (offen, halboffen, geschlossen). Dabei kommen Werkzeuge wie Drucklufthammer oder Kreissäge zum Einsatz, wenn ein direktes Herausziehen der Wicklungen nicht möglich ist.

Strahlen

Im Anschluss erfolgt die Reinigung des Maschinenkörpers in einer Strahlanlage mit Walnussgranulat. Dieses Strahlmittel ist abrasiv genug, um Lack-, Isolations- und Ascherückstände zuverlässig zu entfernen, dabei jedoch schonend zum Blechpaket. Zudem ist Walnussgranulat ein Isolierstoff und verhindert dadurch die Entstehung elektrischer Brücken. Nach dem Strahlen werden alle Rückstände und das verwendete Granulat abgesaugt.

Grundieren

Nach der Reinigung wird der Maschinenkörper mit einer Grundierung versehen, die sowohl als Korrosionsschutz dient als auch eine saubere, haftfähige Oberfläche für die nachfolgende Tränkung bietet. Die verwendete Farbe ist mit dem später eingesetzten Tränkharz verträglich.

Sondermaschinen/Ausnahmen

Nicht alle Maschinen eignen sich für das Pyrolyseverfahren. Besonders bei empfindlichen Materialien oder spezifischen Bauformen kann die thermische Behandlung bei rund 400 °C zu irreversiblen Schäden führen. Ausgeschlossen sind daher insbesondere Maschinen, deren Blechpaket eine Papierisolation zwischen den Lamellen aufweist, ebenso wie Gehäuse aus Aluminium oder anderen wärmeempfindlichen Werkstoffen. Auch Schleifringkörper, Kommutatoren sowie Schweißkonstruktionen mit inneren Spannungen dürfen nicht pyrolysiert werden, da sie sich unter der hohen Temperatur verformen oder beschädigt werden könnten.