

Auswuchtung bei hoher Drehzahl

Das dynamische Auswuchten von Rotoren ist ein wesentlicher Faktor bei der Herstellung und Reparatur von Turbomaschinen. Ein Rotor mit Unwuchten kann im Betrieb bedeutende Schwierigkeiten verursachen. Diese können eine zeitgerechte Inbetriebnahme einer Anlage verhindern. Zudem kann ein unwuchtiger Rotor Schäden verursachen, die den Nennwirkungsgrad der Maschine beeinträchtigen, ihre Zuverlässigkeit reduzieren, die Betriebs- und Wartungskosten erhöhen oder noch Schlimmeres bewirken.



1 Eine große Dampfturbine für ein Kraftwerk beim Auswuchten mit niedriger Drehzahl auf dem Prüfstand. Dieser Auswuchtstand für niedrige Drehzahlen kann Rotoren bis 50 Tonnen bei 500 U/min aufnehmen.

Rotoren sind Bestandteil vieler Maschinen, wie zum Beispiel Generatoren, Getriebe, Kompressoren und viele mehr. Das Vorhandensein einer Unwucht an einem Rotor kann die ganze Einrichtung zum Vibrieren bringen. Diese induzierte Vibration kann ihrerseits einen übermäßigen Verschleiß von Lagern, Laufbüchsen, Wellen, Spindeln, Getrieben sowie der baulichen Einrichtungen zur Folge haben. Die Vibrationen bewirken Wechselbeanspruchungen im Unterbau und in den Gehäusen, die schließlich zu einem vollständigen Versagen führen können. Deshalb ist es nicht überraschend, dass der wichtigste Grund, den die meisten unserer Kunden für das Auswuchten eines Rotors bei höchst möglicher Drehzahl angeben, wenig mit den technischen Gesichtspunkten des Auswuchtens oder einer Modalanalyse zu tun haben. Es ist eher die

Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Rentabilität und Effizienz der Geschäftseinheit, die in die Waagschale geworfen wird, um die mit dem Betrieb und der Wartung von schnelllaufenden Rotoren verbundenen Gesamtrisiken zu reduzieren.

Preisgünstige Versicherung

Ein Auswuchten des Rotors bei voller Drehzahl als Teil einer Überholung gilt als preisgünstige Versicherung. Das Auswuchten in der Werkstatt hingegen erfolgt normalerweise bei niedrigen Drehzahlen – in der Regel 1500 U/min – vor allem wegen der zu erwartenden tieferen Kosten und der Zeitvorteile im Vergleich zum Aufwand, der zum Auswuchten eines Rotors bei voller Drehzahl erforderlich ist. Auswuchtstände für niedrige Drehzahlen gibt es in verschiedenen Ausführungen und Größen, je nach den aus-

zuwuchtenden Teilen und dem verwendeten Maßsystem. Die meisten Leute sind mit einer Auswuchtmaschine bei einer Reifenfirma vertraut, wo an der Felge Bleigewichte angebracht werden, um eine Unwucht zu beseitigen. Ein ausgewuchtetes Rad sorgt für ein komfortables Fahren auf der Straße bei sämtlichen Geschwindigkeiten. Für die meisten niedertourigen Rotoren mit starrer Welle und ohne vorherige Schwierigkeiten im Betrieb genügt normalerweise ein Auswuchten in der Werkstatt bei niedrigen Drehzahlen 1. Diese Rotoren laufen typisch bei Drehzahlen, die das erste kritische Drehzahlband nicht erregen 2. Die meisten dieser Rotoren laufen unterhalb des Einflusses des zweiten kritischen Drehzahlbandes, das manchmal die erste Biegeschwingung genannt wird, wo die Achse die Form einer Sinuswelle mit

erkennbaren Knotenpunkten außerhalb der Mittellinie der radialen Gleitlager einnimmt [3].

Für hoctourige Rotoren obligatorisch

Das Auswuchten bei voller Drehzahl empfiehlt sich für Rotoren, die unterhalb des zweiten kritischen Drehzahlbereichs laufen und ist zwingend für alle Rotoren, die unter dem Einfluss oder oberhalb des zweiten kritischen Bereichs drehen. Einige dieser hoctourigen Rotoren erfordern zudem ein Abstimmen der niedertourigen Restunwucht, um es dem Rotor zu ermöglichen, ohne übermäßige Auslenkung der Mittellinie durch das erste kritische Drehzahlband zu kommen. Übermäßige Auslenkungen der Welle während der An- und Abfahrzyklen öffnen die Spiele der Wellendichtungen, können die Lager beschädigen und auch ein starkes Schleifen der Oberflächen des Rotors an den stationären Teilen des Gehäuses mit sich bringen. Alle Erstausrüster verfügen über eigene Auswuchtanlagen für volle Drehzahlen und wuchten alle neuen Rotoren der verschiedenen Produktlinien. Diese Anlagen werden in beschränktem Maße für Kunden zur Verfügung gestellt. Allerdings stehen nur sehr wenige dieser Wuchtbunker dem unabhängigen Reparaturmarkt zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung. Angesichts der gefüllten Auftragsbücher für neue Ausrüstungen – in einem noch nie dagewesenen Ausmaß – ist es heute schwieriger denn je, einen Termin bei den Auswucht-

anlagen der Erstausrüster zu bekommen, der mit dem Überholungszyklus der Kunden im Einklang steht.

Extensive Erfahrung

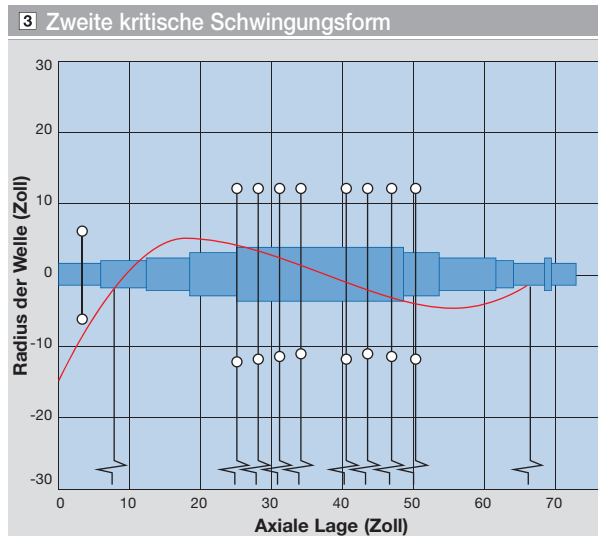
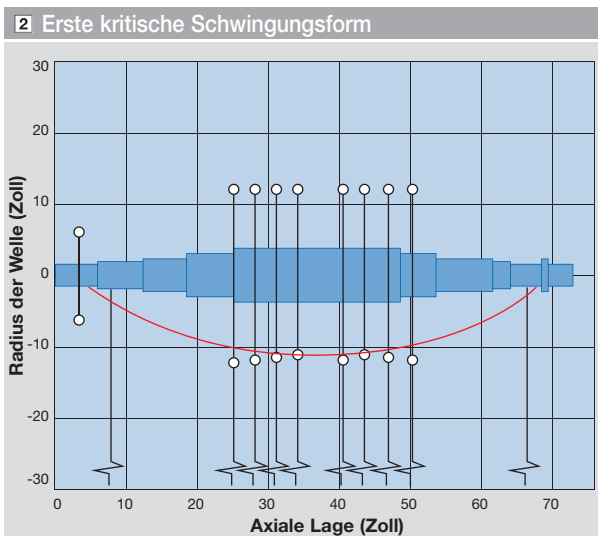
Sulzer Turbo Services überholt zahlreiche Rotoren, bei denen der Kunde ein Auswuchten bei voller Drehzahl als Teil der Reparaturarbeiten verlangt oder dieses aufgrund der vergangenen Betriebsbedingungen von Vorteil zu sein scheint [4]. Sulzer Turbo Services befasst sich auch mit Modernisierungsarbeiten, wobei konstruktive Verbesserungen von Dichtungen und Lagern vor der Wiederinbetriebnahme im Bunker demonstriert werden können. Um ihre Kunden noch besser bedienen zu können, betreibt Sulzer Turbo Services zwei Auswuchtanlagen bei voller Drehzahl, wovon diejenige in ihrer Werkstatt in der Nähe von Houston, Texas, zu den größten und modernsten Bunkern der Vereinigten Staaten gehört [5], sowie eine in Winterthur, Schweiz. Beide Anlagen werden ständigen Revisionen und Modernisierungen unterworfen, um mit den Fortschritten der Branche Schritt zu halten. Diese beiden Wuchtbunker bieten allen sechs strategisch platzierten regionalen Reparaturzentren von Sulzer Turbo Services sowie anderen Erstausrüstern und Kunden zuverlässige und zeitgerechte Dienstleistungen. Beide sind mit moderner Elektronik und fortschrittlichen Diagnosemöglichkeiten ausgestattet, um eine dem neuesten Stand der Technik entsprechende Fehlerbehebung anzubieten.

Generatorfelder

Einer der Bereiche, die wir speziell für Generatorfelder entwickelt haben, ist ein Verfahren, welches ermöglicht, mit einer Luftspaltsonde die Änderungen im radialen Fluss bei drehendem Rotor zu erfassen und kurzgeschlossene Windungen festzustellen. Die sich dabei ergebende Wellenform lässt durch minimale Änderungen der Steilheit des Flussanstiegs bei Betriebsdrehzahl des Feldes das Vorhandensein von einer oder mehreren kurzgeschlossenen Windungen erkennen. Für diesen Prozess wird das Feld mit seiner normalen Drehzahl mit normaler Anregung betrieben. Dieser Prozess weist auf Probleme hin, die den einwandfreien Betrieb beeinflussen und die Bildung von heißen Stellen im Generatorfeld bewirken können, die normalerweise erst bei der Inbetriebnahme festzustellen sind. In vielen Fällen würde die Entdeckung solcher Probleme vor Ort einen Betriebsstillstand zur Folge haben, um die notwendigen Korrekturen vorzunehmen.

Forschungs- und Entwicklungsplattform

Wegen der Einzigartigkeit der Anlagen werden die Bunker auch von den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen von Sulzer Turbo Services, Sulzer Metco (Oberflächenbeschichtungen) und unserer unabhängigen Forschungseinheit Sulzer Innotec verwendet, um verschiedene Dichtsystemkonfigurationen zu testen. Die Tests umfassen die Messung der Beständigkeit von ver-



schiedenen Anstreifschichten für segmentierte Dichtungsringe der kommenden Generation von Dampfturbinen und industriellen Gasturbinen.

Unwucht von Rotoren

Rotoren werden auf verschiedene Weise aufgebaut, um dem Prozessgas oder der Prozessflüssigkeit, den Beanspruchungen der Teile und den zur Verfügung stehenden Werkstoffen Rechnung zu tragen. Einige Beispiele sind nachstehend aufgeführt:

- Massive Schmiedeteile für Dampfturbinen und Heißgas-Expansionsmaschinen
- Geschmiedete Wellen mit aufgeschumpften Scheiben oder Flügelrädern
- Geschmiedete Wellen mit aufgeschumpften Hülsen, Scheiben und anderen Ausstattungsteilen

- Geschmiedete Scheiben, die mit einer zentralen Schraube oder mit mehreren Verbindungsbolzen zusammengebaut sind – bei Letzterem wird eine Kupplung vom Typ Hirth oder Curvic für die Übertragung des Drehmomentes zwischen den Scheiben und der Welle verwendet
- Geschweißte zylindrische Körper: Diese findet man gewöhnlich bei sehr großen Dampfturbinen oder hochtourigen Axialkompressoren, wo die Welle aus Hohlzylindern besteht und mittels Laser zusammenschweißt ist, um das Gewicht des Rotors zu reduzieren.
- Schließlich eine Mischung der oben genannten Methoden

Die Erregung von Schwingungsformen wird zudem durch Unterschiede der Werkstoffe, Materialqualität, Rotorgröße und Starrheit verkompliziert. Jede Unwucht entlang des Rotors, die mit der Auslenkung der Schwingungsform zusammenfällt, verstärkt die Auslenkung an dieser Stelle. Die Unwucht bewirkt, wenn sie nicht korrigiert wird, an den Lagern eine Kraft als Folge der Vibration. Die Bewegung von einzelnen Scheiben oder Scheibengruppen entlang der Welle oder weg von der Mittellinie im Betrieb der Maschine kann problematisch werden, insbesondere wenn die Masserverschiebung in einen Bereich vordringt, bei der die Auslenkung verstärkt wird.

Qualitätssicherungsprozess

Wenn ein neuer Rotor hergestellt wird, wuchtet der Erstausrüster diesen als Bestandteil des Qualitätssicherungsprozesses oft bei voller Drehzahl aus. Die anfängliche Auswuchtung liefert dem Besitzer einen Bezugswert, der bei nachfolgenden Inspektionen als Vergleichsbasis gilt. Es ist auch wichtig, mit der Welle verbundene Teile wie Kupplungsablenker und Druckausgleichsscheiben zu berücksichtigen, da diese die Unwucht und das Verhalten des Rotors beeinflussen können. Das schrittweise Stapeln und Auswuchten eines Rotors kann zu genügender Laufruhe bei niedrigen Drehzahlen führen und ist ein wichtiges Instrument zur Sicherstellung, dass der Rotor mit einem niedrigen Schwingungspegel gebaut ist. Diese Methode ist

von Sulzer Turbo Services oft angewendet worden, um einen Rotor mit zuvor schlechtem Schwingungsverhalten zu richten. Das schrittweise Stapeln und Auswuchten bietet keine Gewähr für einen problemlos laufenden fertigen Rotor, da es die durch Systemerregungen verursachten Vibrationen nicht berücksichtigt, wenn der Rotor durch die kritischen Drehzahlbänder bis zur Betriebsdrehzahl beschleunigt wird.

Während der Service-Inspektion eines Rotors lohnt es sich immer, die – zum Korrigieren der Unwucht dem Rotor hinzugefügten – Gewichte zu kontrollieren. Das Ziel jedes Auswuchtprozesses sollte die Verwendung von möglichst wenigen Gewichten zum Korrigieren der Unwucht sein.

Betrieb oberhalb der ersten kritischen Drehzahl

Viele hochoberhalb der ersten kritischen Drehzahl laufen oberhalb der ersten kritischen Drehzahl. Bei solchen Rotoren ist es auch wichtig, die Unwuchtreaktion bei der ersten kritischen Drehzahl zu korrigieren. Dies aus den folgenden zwei Gründen:

- Die Unwuchtkräfte und die sich daraus ergebenden Wellenauslenkungen können so gewaltig sein, dass der Rotor nicht über die erste kritische Drehzahl hinausgeht, oder aber erst, nachdem die Wellendichtungen zerstört worden sind. Selbst ein minimaler Kontakt zwischen der Welle und den Dichtungen erhöht die Werte des Dichtungsspiels und reduziert den Wirkungsgrad der Maschine. Dies bewirkt ferner eine lokale Erhitzung des Rotors, welche die Auslenkung bei der ersten kritischen Drehzahl erhöhen und eine permanente Durchbiegung der Welle zur Folge haben kann.
- Ein Rotor könnte beim An- und Abfahren – selbst bei geregelter Beschleunigung und Bremsung – während zu langer Zeit bei der ersten kritischen Drehzahl verweilen, wodurch der Maschine erheblicher Schaden zugefügt wird.

Feld-Auswuchtung vs. Auswuchtung bei voller Drehzahl

Ein Rotor kann auch mit Erfolg in seinem eigenen Gehäuse vor Ort ausgewuchtet

4 Hochoberhalb der ersten kritischen Drehzahl, typisch für den Typ, der ein Auswuchten mit hohen Drehzahlen verlangt.



werden. Der Zugang zu den Auswuchtebenen kann jedoch ein einschränkender Faktor sein. Einige Maschinen tragen dieser Anforderung Rechnung, indem sie eine einzige Zugangsöffnung oder eine Reihe von Zugangspunkten zu beiden Endebenen aufweisen, damit nicht die ganze obere Hälfte des Gehäuses weggenommen werden muss. Wenn sich jedoch die Unwucht nicht in einer zugänglichen Ebene befindet, ist die Korrektur an den Endebenen nur ein Kompromiss. Wenn kein Zugang geboten wird, muss das ganze obere Gehäuseteil – oder ein Teil davon – weggenommen und nach jedem Auswuchtvorgang wieder montiert werden. Hierbei sind üblicherweise mindestens fünf Auswuchtvorgänge notwendig.

Auswuchtung auf der Halbschale

Unter einigen sehr extremen Umständen hat Sulzer Turbo Services Feld-Auswuchtungen auf der Halbschale durchgeführt. Dies bedeutet, dass die obere Hälfte des Gehäuses abgehoben, die Dichtungsringe der unteren Hälfte entfernt und dann die Lager zusammgebaut und montiert werden. Bei einer Dampfturbine wird

zum Beschleunigen des Rotors auf die gewünschte Drehzahl, bei der die Messungen durchgeführt werden, ein externes Medium – in der Regel trockene Luft – über eine Düse zugeführt. Im Fall einer großen, motorbetriebenen Turbomaschine wird der Antriebsmotor verwendet. Dieses Vorgehen wird durch die zulässige Anzahl Anläufe des Motors im Tag begrenzt. Wie man sich vorstellen kann, handelt es sich dabei um eine zeitraubende Angelegenheit.

Rotor wuchten vor Ort

Mit dem Auswuchten eines Rotors im Feld sind bedeutende Risiken und Kosten verbunden. Jedes Mal, wenn ein Gehäuse geöffnet wird, besteht die Gefahr, Fremdkörper in den Strömungspfad zu bringen oder eine Komponente zu beschädigen. Da die meisten Maschinen ein Teil eines Prozesses sind, muss dieser Prozess mehrfach gestartet und gestoppt werden, um den Rotor auszuwuchten. Man stelle sich vor, den Betreiber eines Kernkraftwerks zu bitten, die Brennstäbe im Verlauf von vier bis fünf Tagen ein halbes Dutzend Mal ein- und auszufahren, um etwas zu erreichen, das man außerhalb

des Betriebs in einer kontrollierten Umgebung mit der richtigen Ausrüstung während einer Jahresinspektion hätte tun können. Um die Situation noch ein wenig ungemütlicher zu machen, zwingt eine Feld-Auswuchtung den Betreiber, das Verhalten des Rotors anzupassen, um die kombinierte Auswirkung aller nicht rotierenden Teile (wie zum Beispiel Versatz, Fundament- oder Rohrleitungsresonanzen) zu korrigieren. Wenn ein Rotor mit einem unerwünschten Schwingungspegel in seinem Gehäuse läuft, nachdem er bei voller Drehzahl ausgewuchtet worden ist, ist das wahrscheinlich nicht ein Rotorproblem. Ein Systemproblem verlangt weitere Untersuchungen und Korrekturmaßnahmen.

Zulässige Unwucht

Null Unwucht wäre immer wünschenswert, und viele Ingenieure werden stundenlang über die zulässige Unwucht diskutieren. Angesichts der Tatsache, dass «Null» selten zu vertretbaren Kosten erreicht werden kann, wird für verschiedene Maschinentypen ein gemeinsamer Pegel auf der Basis von Industriestandards gewählt. Für das Auswuchten bei voller Drehzahl verlangt das American Petroleum Institute (API) Schwingungspegel von weniger als 1 mm/s oder 7400 U/min, je nachdem, welcher Wert größer ist.

Eine Investition, die sich auszahlt

Es gibt kaum eine ungemütlichere Zeit im beruflichen Leben eines Rotationsmaschinen-Ingenieurs, Wartungschefs oder Betriebsleiters, als wenn ein kritischer Teil eines Prozesses nicht zeitgerecht starten kann, nicht läuft oder zwischen Wartungszyklen unzuverlässig wird. Die Kosten für den Versuch, die Probleme zu korrigieren, können hoch sein, wenn man die verlorene Produktion berücksichtigt. Die dynamischen Auswuchtungsmethoden von Sulzer sparen im Vergleich zu herkömmlichen Vor-Ort-Methoden Zeit und Geld.

Shaun West

Sulzer Turbo Services
Zürcherstraße 12
8401 Winterthur
Schweiz
Telefon +41 52 262 34 44
shaun.west@sulzer.com

5 Eine Gasturbinen-Rotoreinheit wird in den Bunker geladen. Der Kompressor- und der Turbinenteil sind zusammengeschräubt.

