

Modifikation und Reparatur einer 90-MW-Dampfturbine nach einem katastrophalen Ausfall

An einer 90-MW-Dampfturbine kam es durch den Bruch einer Schaufelfußverzahnung an einer der Rotorscheiben zu schweren Schäden an den Rotor- und Stator­komponenten, die wiederum zu einem katastrophalen Ausfall der Turbine führten. Anstatt einen neuen Rotor zu kaufen, was mit inakzeptablen Kosten und Lieferzeiten verbunden gewesen wäre, beauftragte der Kunde Sulzer mit der Überarbeitung der Schaufelfußgeometrie und der Reparatur von 6 der 12 Rotorscheiben. Der gesamte Engineering- und Reparaturprozess dauerte nur 18 Wochen.

Der Grund für den katastrophalen Ausfall der 90-MW-Dampfturbine war ein Versagen der Stufe T13 aus Stahl der Klasse 7 gemäß ASTM A470. Der Niederdruckrotor ist als zweiflutiger Vollrotor mit mittigem Dampfeintritt ausgeführt ¹. Zum Ausfall kam es, als sich im Betrieb eine Schaufel vom Rotor löste und nachgelagerte Stator- und Rotor­komponenten schwer beschädigte. Darüber hinaus wies auch der Rotorkörper starke Reibspuren auf.

Sulzer Turbo Services erhielt den Auftrag, den Rotor zu reparieren und eine konstruktive Lösung zu entwickeln, die einen derartigen Schadensfall künftig verhindert. Vorgesehen war eine Überarbeitung des Schaufelfußes, um die Spannungskonzentration an Zapfen der Tannenbaumprofile der Rotorscheiben

zu reduzieren. Nach Abschluss der Konstruktionsarbeiten wurde der Rotor durch Schweißen der beschädigten Scheiben repariert. Neue Laufschaufel­sätze wurden gefertigt, und die Membranen wurden entweder repariert oder erneuert. Hinzu kamen kleinere Reparaturen am Hochdruckrotor und Generator, die Installation vor Ort und die Überwachung der Inbetriebnahme.

Die Hauptursache für den Ausfall war die Bildung von Rissen an den Tannenbaumprofilen der Stufe T13. Aufgrund des symmetrischen Aufbaus des Rotors empfahlen die Experten von Sulzer dem Kunden auch die Untersuchung der gegenüberliegenden Turbinenseite. Bei der Untersuchung der generatorseitigen Profile (durch Sicht- und Magnetpulverprüfung) wurden weitere Risse an den

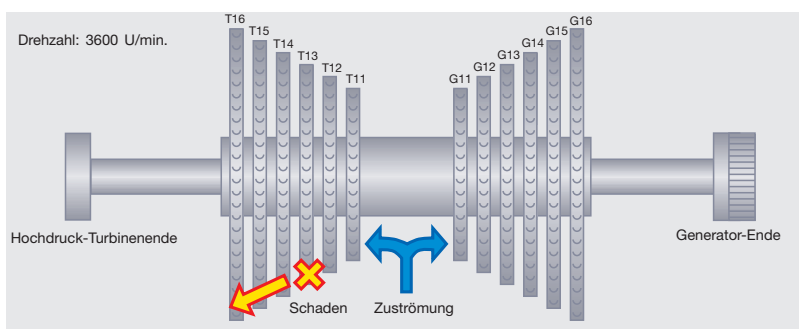


² Typische Rissposition an den Verbindungszapfen. Die Risse verliefen um das gesamte Laufrad.

Stufen T14, T15, G13, G14 und G15 festgestellt, die später vor Ort zu Schäden geführt hätten.

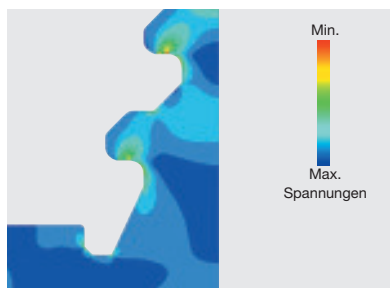
Die Abschnitte der Stufen T13 und T14 wurden vor der Ankunft des Rotors bei Sulzer entfernt. Bild ² zeigt die typische Lage der Risse in den Ecken der Verbindungszapfen. Wie Magnetpulverprüfungen ergaben, verliefen die Risse um das gesamte Laufrad herum sowohl an den oberen als auch den unteren Zapfen.

¹ Niederdruckrotor der Dampfturbine mit symmetrischer Zuströmung.

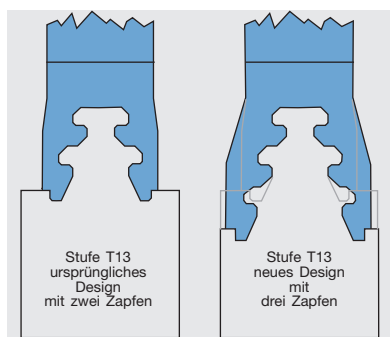


Analyse und Modifikationen

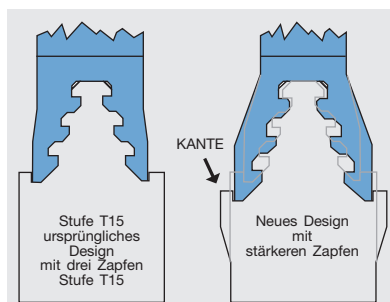
Hauptziel der technischen Analyse war die Evaluierung der Spannungsverteilung an der ursprünglichen Rotorscheibe und die anschließende Über-



3 Darstellung der kritischen Spannungen an der ursprünglichen Verzahnung.



4 Die Zahl der Verbindungszapfen in der Stufe T13 wurde von ursprünglich zwei (links) auf drei (rechts) erhöht. Mit dem neuen Design konnten die Spannungen auf 81% der ursprünglichen Werte reduziert werden.



5 Durch das neue Design der Stufe T15 (rechts) wurden die Spannungen um fast 50% der ursprünglichen Werte (links) reduziert.

arbeitung der Schaufelfußprofile zur Reduzierung der Spannungen an den Verzahnungen. Da der Rotor zum (unveränderten) Stator der Turbine passen sollte, waren nur begrenzte geometrische Veränderungen möglich.

Mithilfe einer Finite-Elemente-Analyse (FEA) wurde die Spannungsverteilung an den Scheiben unter normalen Betriebsbedingungen bestimmt. Die Modellgeometrie wurde von den vorhandenen Teilen der Rotorscheibe und den Laufschauflern abgeleitet und mit einem CAD-Programm (Computer-Aided Design) gezeichnet. Anschließend wurden die

CAD-Modelle zur Berechnung der Spannungsverteilung in den Finite-Elemente-Solver importiert 3.

Bild 4 zeigt das veränderte Design der schadhaften Stufe (T13). Durch das neue Design konnte die Spannung auf 81% des ursprünglichen Werts reduziert werden. Die gleichen Untersuchungen wurden auch für die Stufe T15 durchgeführt. Nach mehreren Iterationen wurde ein Fußdesign gefunden, das die Spannungen um fast 50% der ursprünglichen Werte reduziert 5. Da das endgültige Design nicht zur ursprünglichen Geometrie der Rotorscheibe passte, wurde ein Teil der Scheibe verbreitert, um die ursprünglichen Proportionen an der Außenkante wiederherzustellen. Die ursprünglichen Abstände zu den stationären Teilen wurden durch Abschleifen der Membranen wiederhergestellt.

Des Weiteren wurden die Spannungen durch Verwendung von elliptischen Auskehlungen anstatt der üblichen geraden Ausführung 6 reduziert. Eine großzügigere Auskehlung trägt zur Verteilung der Spannung bei und hilft, das Auftreten von starken lokalen Spannungen zu verhindern und die Spannungen insgesamt zu verringern.

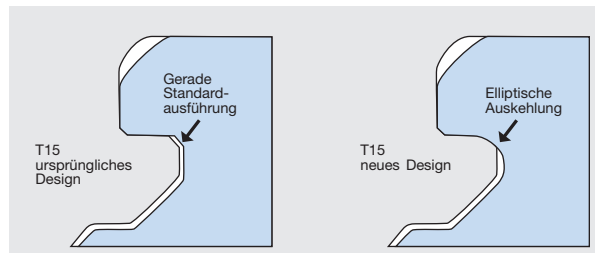
Anatomie der Schweißreparaturen

Bei der Schweißvorbereitung wurden die beschädigten Abschnitte der Rotorscheiben vom übrigen Rotor abgetrennt. Die Position der radialen Schnitte wurde durch die FEA im Rahmen der technischen Analyse bestimmt. Die Trennung erfolgte so, dass ein ausreichender Abstand der Wärmeeinflusszone (WEZ) zu Bereichen mit hoher Spannungskonzentration gewährleistet blieb.

An der Schnittstelle wurden auf beiden Seiten der Scheibenringe sogenannte «Weld-off-Ringe» eingeschweißt, um das Auftragschweißen zur Rekonstruktion der Rotorscheibe zu unterstützen. Bild 7 zeigt die Stufen T12, T14 und T15 bei der Vorbereitung mit teilweise installierten Weld-off-Ringen und Thermo-elementen zur Temperaturüberwachung.

Schweißen

Beim nachfolgenden Unterpulver-Auftragschweißen mussten die Scheiben ausreichend vorgeheizt werden, und die Tem-



6 Die Reduzierung der Spannungen ist auch auf die Verwendung von elliptischen Auskehlungen (rechts) anstelle der üblichen geraden Ausführung (links) zurückzuführen.

peratur musste während des gesamten Vorgangs aufrechterhalten werden, um eine hohe Schweißqualität zu gewährleisten. Aufgrund des engen Zeitplans für die Reparaturarbeiten wurden beide Enden des Rotors gleichzeitig geschweißt. Eine Nahaufnahme der Auftragschweißung ist in 8 dargestellt.

Unmittelbar nach Abschluss der Schweißarbeiten wurden die Scheiben einer Wasserstoffarmglühung unterzogen. Dabei wird der in der Schweißnaht eingeschlossene Wasserstoff an die Oberfläche gebracht.

Spannungsarmglühen

Nach der maschinellen Bearbeitung des Rotors zur Herstellung des erforderlichen Profils für das Spannungsarmglühen wurde die Schweißqualität durch Magnetpulverprüfungen mit Nasspulver und Ultraschallverfahren überprüft.

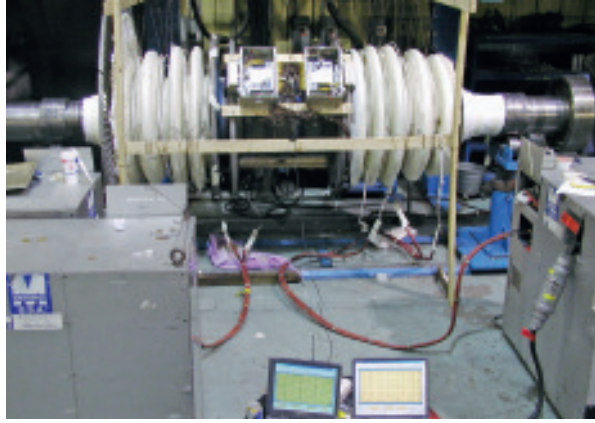
Das Spannungsarmglühen des Rotors erfolgte in horizontaler Lage bei langsamer Drehung, wobei die betreffenden Bereiche durch Induktionsglühung auf die richtige Temperatur gebracht wurden.

7 Die Stufen T12, T14 und T15 bei der Vorbereitung mit teilweise installierten «Weld-off-Ringen» und Thermo-elementen zur Temperaturüberwachung.





8 Nahaufnahme der Auftragschweißung.



9 Der Rotor wurde in horizontaler Lage bei langsamer Drehung spannungsarm geglüht.

Dies erhöht die Effizienz des Vorgangs, da eine ausschließliche Behandlung der vom Schweißen betroffenen Bereiche möglich ist. Außerdem braucht der große Rotor nicht vertikal in einem Ofen untergebracht werden. Die Steuerung der Stromversorgung für die Induktion erfolgte über Thermoelemente an den Scheiben, wobei die Daten drahtlos an ein ortsfestes Steuermodul übertragen wurden 9.

Die letzten Schritte der Reparatur umfassten die Endbearbeitung der überarbeiteten Fußprofile, die Montage der Schaufeln am Rotor und die anschließende Auswuchtung 10.

Zusammenfassung

Die Schweißreparaturen, die Herstellung und Montage der Schaufeln sowie das Auswuchten des Rotors erfolgten in weniger als 18 Wochen inklusive der technischen Analyse, die insgesamt vier Wochen in Anspruch nahm. Ermöglicht wurde die rasche Durchführung der Reparaturarbeiten dadurch, dass mit den Schweißvorbereitungen schon begonnen werden konnte, als die Engineeringarbeiten noch in vollem Gange waren, beide Enden des Rotors gleichzeitig geschweißt wurden und das Spannungsarmglühen durch Induktionsglühung erfolgte.

Fernando Romero
 Sulzer Turbo Services Argentina S.A.
 Talcahuano 736 2do "B"
 Ciudad Autonoma de Buenos Aires, C1013AAP
 Argentinien
 Telefon +54 11 4373 6327 224
 fernando.romero@sulzer.com

Luis Rodriguez
 Sulzer Turbo Services Inc.
 11518 Old La Porte Rd.
 La Porte, TX, 77571
 USA
 Telefon +1 713 567-2776
 luis.e.rodriquez@sulzer.com



11 Der reparierte Rotor beim Auswuchten.