

Numerische Simulation erhöht Betriebssicherheit

WOLFRAM LIENAU
PAUL MEUTER
SULZER PUMPS

Moderne Kohlekraftwerke werden aus wirtschaftlichen Gründen für den Betrieb mit Gleitdruckfahrweise ausgelegt. Dabei variiert der Druck im Speisewasserbehälter entsprechend dem Lastzustand des Kraftwerksblocks. Mit einer aufwändigen Finite-Elemente-(FE-)Berechnung simulierte Sulzer Pumps die dabei in den Pumpen auftretenden thermo-mechanischen Belastungen. FE-Rechnungen liefern über das Verhalten solcher hoch belasteter Pumpen bereits in der Designphase Informationen, die bisher nur im Experiment gewonnen werden konnten.

▶ Bei der Umsetzung moderner Betriebskonzepte für große thermische Kraftwerke kommt den Speisepumpen entscheidende Bedeutung zu (Bild 1). Je nach der Art des Antriebs wird unterschieden zwischen Turbospeisepumpen – diese werden durch den

Dampf des Kraftwerks angetrieben – und Elektrospeisepumpen (ESP). Die ESP übernehmen dabei Aufgaben im Bereich der Betriebssicherheit beim Ausfall der Turbospeisepumpen und im Anfahrbetrieb. Die als Standby-Pumpen eingesetzten ESP haben die Auf-

gabe des Schnellstarts und der Lastübernahme bei jedem Betriebszustand. Bei Betriebsübergängen oder -störungen müssen die Turbospeisepumpen entweder vorgewärmt (warmgefahren) oder gekühlt (kaltgefahren) werden, damit Schäden durch thermische Spannungen oder Druckstöße in den Rohrleitungen verhindert werden.

Modernes Kraftwerkskonzept

Das Braunkohlekraftwerk Lippendorf bei Leipzig (DE) verfügt mit $2 \times 933 \text{ MW}_{el}$ installierte Leistung über die modernste Großfeuerungstechnik in den östlichen Bundesländern Deutschlands. Das Kraftwerk produziert hauptsächlich Strom, liefert aber auch Fernwärme (310 MW_{th}). Eigentümer sind die Vattenfall Europe AG, die E.ON Kraftwerke GmbH und die Energie Baden-Württemberg AG (EnBW). Sulzer Pumps lieferte die Speisepumpen für dieses und für weitere Neubau-Kraftwerke derselben Betreiber.

Der Gleitdruckbetrieb ermöglicht es, die Dampfturbinen abhängig von der Netzlast zu regeln, und trägt damit zum wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Betrieb des Kraftwerks bei. Allerdings stellt dieser Betrieb auch sehr hohe Ansprüche an die Speisepumpen (Bild 2), die großen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Zum ersten Mal wurde in diesen Kraftwerken ein

kombiniertes Warmfahr-Kaltfahr-System für die Speisepumpen verwirklicht, das die Belastungen für die Pumpen verringert. Beim Warmfahren werden die Pumpen während des Anfahrvorgangs vorgewärmt oder während kurzer Stillstandszeiten auf Temperatur gehalten. Dies vermeidet zu hohe Spannungen und unzulässige Verformungen im Pumpengehäuse.

Falls der Speisewasserdruck absinkt, senkt das Kaltfahren die Wassertemperatur in der Pumpe so schnell, dass der Siedepunkt nie erreicht wird, wodurch sich thermisch bedingte Druckschwankungen in der Pumpe und den Rohrleitungen verhindern lassen.

Hoch belastete Pumpen

Bei der Inbetriebnahme des Kraftwerks Lippendorf im Dezember 1999 kam es zu einem Schadensfall an den Spaltringen der Pumpenlaufräder der Turbospeisepumpe. Die Aufzeichnungen des Drehmoments der Betriebsüberwachung (Bild 3) zeigten, dass ein erstes Streifen während einer Kaltfahrphase im Rotordrehwerks-

betrieb stattgefunden hatte. Das Rotordrehwerk lässt während der Abkühlphase die Dampfturbine und die Pumpe bei niedriger Drehzahl weiterlaufen, damit Verformungen des Turbinenrotors vermieden werden. Die Vorgänge während dieser Betriebsart sind hoch komplex, da sich die Temperatur und die Strömungszustände in der Pumpe zeitlich ändern. Durch das einströmende kühlere Wasser beim Kaltfahren verformen sich die Pumpe und insbesondere ihr Topfgehäuse relativ zum Rotor so, dass die Spiele an der Unterseite überbrückt werden können. An einem gut ausgestatteten Prüfstand würden sich die genauen Temperatur-Zeit-Verläufe und die Wärmedehnungen bestimmen lassen, die Betriebsüberwachung eines Kraftwerks jedoch liefert nicht alle Daten, die zur Analyse des Hergangs nötig sind.

Aufwändige FE-Simulation

Um den Ablauf zu analysieren, entschied sich Sulzer Pumps für eine FE-Simulation der ganzen Pumpe, einschließlich der stehen-

1 Die Kesselspeisepumpen in modernen Kraftwerken sind hohen Belastungen ausgesetzt. Hier das Braunkohlekraftwerk Lippendorf (DE), für welches diese Pumpen von Sulzer Pumps geliefert wurden.





2 Kesselspeisepumpe im Braunkohlekraftwerk Lippendorf.

den Teile und des Rotors (Bild 4). Aus rund 100 000 Tetraeder-Elementen wurde ein dreidimensionales Modell für das Pumpengehäuse aufgebaut, dessen einzelne Teile durch Zwangsbedingungen miteinander verknüpft wurden. Für das gleiche Berechnungsgitter wurden ein thermisches Modell mit der Knotentemperatur als Freiheitsgrad und ein mechanisches Modell mit den drei Raumrichtungen als Freiheitsgraden erstellt. Thermische Verknüpfungen erlauben die Simulation des Wärme-

flusses in den Berührungszonen, während das mechanische Modell die Verschiebungen aufgrund der Wärmedehnung berechnet.

Der Rotor wurde als 2D-Balkenmodell simuliert. Die Laufräder sind masselose Balkenelemente und modellieren die Wärmedehnung der Rotoren, wogegen das Element der Welle neben der Wärmedehnung auch den Masseneinfluss berücksichtigt. Das Rotormodell ist an zwei Punkten gelagert. Die Position dieser Lagerpunkte wird durch die thermische Verschiebung der Lagerschalen im Gehäusemodell sowie die Lager-einstellung bestimmt. Dadurch ist eine Kopplung zwischen dem Gehäuse und dem Rotor definiert. Die Balkenelemente können mit verschiedenen Randbedingungen für die Temperatur beaufschlagt werden.

Mit diesem Modell wurde der tatsächliche Schadensfall während des Kaltfahrens der Pumpe nachgebildet. Mit der Rotordrehzahl, der Fluidtemperatur und dem Durchfluss wurden die zeitabhängigen Randbedingungen für diesen Vorgang vorgegeben. Mit dem Modell ließen sich dann die Zeitverläufe aller relevanten Größen berechnen. Von größtem Interesse waren die wärmebedingten Ver-

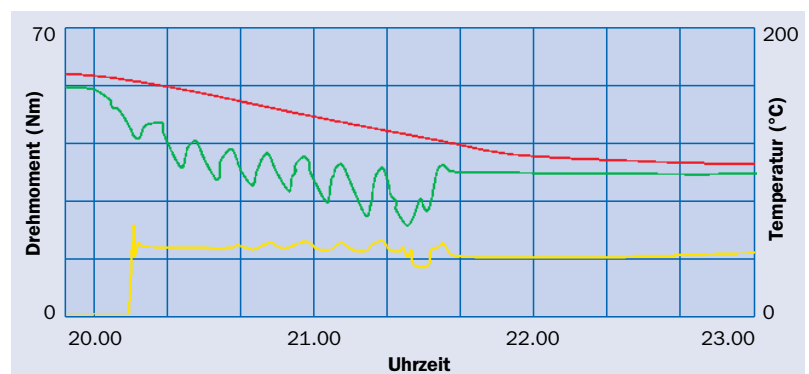
schiebungen des Gehäuses in den Dichtspalten (Bild 5). Die Simulation zeigte deutlich, dass sich während des relevanten Kaltfahrvorgangs Rotor und Gehäuse berührt hatten.

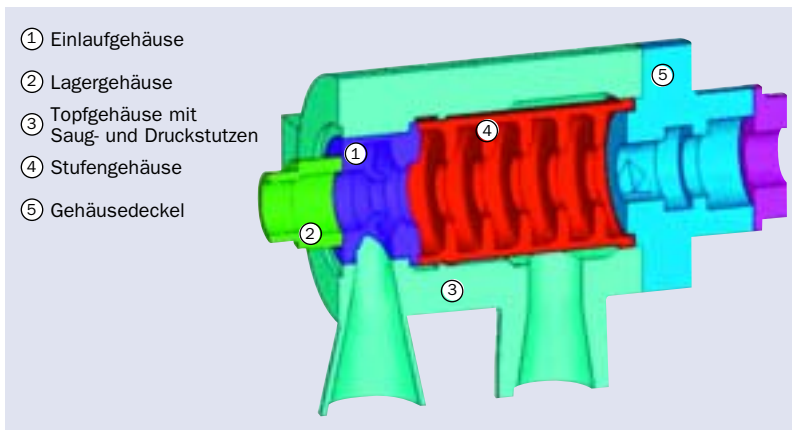
Sicherer Betrieb

Die Analyse eröffnete aber auch den Weg zum störungsfreien Betrieb der Pumpe. Mit größerem Spiel für die Spaltringe und einem genaueren Prozess zum Ausrichten des Rotors in den Lagern konnten zwei Maßnahmen gefunden werden, die den untersuchten Schadensfall in Zukunft verhindern.

Die Abkühlgeschwindigkeit, mit der die Betriebsübergänge vom Normal- zum Kaltfahrbetrieb stattfinden, hat einen Einfluss auf das Verformungsverhalten der Pumpe. Schnellere Temperaturänderungen führen zu höheren Gradienten und stärkeren Verformungen. Die Ergebnisse der FE-Analyse dienten auch dazu, Betriebsregeln für den Kaltfahr- und den Warmfahrvorgang festzulegen, die ein Anstreifen des Rotors sicher vermeiden und gleichzeitig erlauben, das Spiel am Spaltring so klein wie möglich zu halten. Mit Temperaturmessungen im Gehäuse der Pumpe, mit denen die

3 Betriebsaufzeichnungen des Schadenfalls in der Kaltfahrphase: Um 20.10 Uhr schaltet sich das Rotordrehwerk ein (gelbe Kurve = Drehmoment). Die Speisewassertemperatur (grün) zeigt wegen des ungenügenden Kaltfahrsystems große Schwankungen. Die nachfolgenden gleichfrequenten Schwankungen im Drehmomentverlauf sind ein Hinweis, dass der Rotor das Gehäuse streift. Rot ist die Gehäusetemperatur.





4 Alle wichtigen Teile des Pumpengehäuses wurden in einem FE-Modell nachgebildet. Durch Ausnutzen der Symmetrie ließ sich die Größe des Berechnungsgitters reduzieren.

gerechneten Verformungswerte geprüft wurden, ließen sich die Berechnungen zusätzlich absichern. Seit der Durchführung aller Maßnahmen ist die Pumpe wieder in Betrieb und läuft seit Mitte 2000 ohne Ausfall.

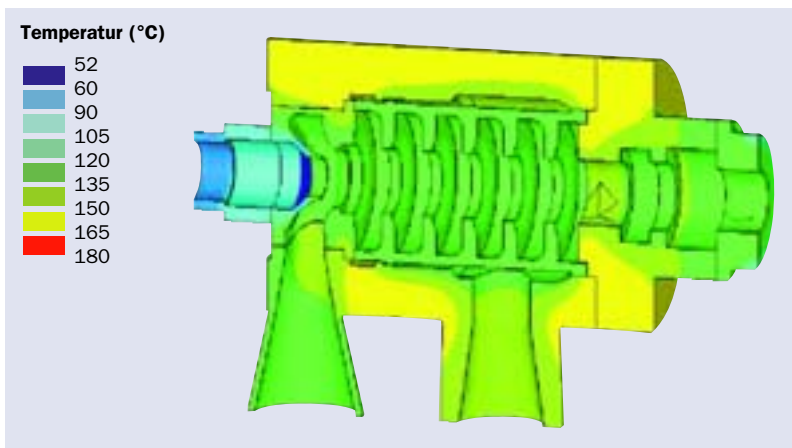
Werkzeug mit Zukunft

Sulzer Pumps zeigte, dass die Finite-Elemente-Analyse geeignet ist, thermo-mechanische Verformungen an komplizierten Bauteilen vorherzusagen. Falls gemessene

Zeitverläufe für einzelne Größen vorliegen, kann durch Anpassen der thermischen Randbedingungen das Modell so kalibriert werden, dass es sich zur Berechnung anderer Lastfälle benutzen lässt. Damit können die FE-Simulationen Aussagen über die Einsatzgrenzen einer Pumpe liefern. Da die geometrischen Daten der Pumpe – wie das Verhältnis von Länge zu Dicke des Gehäuses – die thermischen Eigenschaften der Maschine beeinflussen und diese

nicht mit einfachen analytischen Methoden bestimmt werden können, wird die FE-Analyse zukünftig bereits in der Designphase eine größere Rolle spielen. Mit einem FE-Modell können Wärmedehnungen an kritischen Stellen untersucht werden, und es lässt sich die Wirksamkeit konstruktiver Maßnahmen – wie beispielsweise die Anordnung von Saug- und Druckstutzen – vorab bestimmen. Damit ist die FE-Analyse ein Werkzeug, dank welchem künftig betriebssichere Pumpen in kürzerer Zeit und mit weniger Versuchsaufwand gebaut werden können. ◀

5 Die großen Temperaturunterschiede im Gehäuse – hier der Zustand nach einer simulierten Zeit von 102 Minuten – führen zu wärmebedingtem Verzug. Dadurch verringert sich das Spiel in den Laufradspalten.



KONTAKT
 Sulzer Pumpen AG
 Wolfram Lienau
 Postfach 414
 8401 Winterthur
 Schweiz
 Telefon +41 (0)52-262 39 88
 Telefax +41 (0)52-262 01 80
 wolfram.lienau@sulzer.com