

# REVISION DER MAGNETGELAGERTEN PUMPE NACH LANGZEITEINSATZ IM BRAUNKOHLKRAFTWERK

**T. Rottenbach, F. Worlitz**

*Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik*

*Hochschule Zittau/Görlitz*

*Theodor-Körner-Allee 16*

*02763 Zittau, Germany*

*Tel.: +493583611383, Fax: +493583611288*

*Email: T.Rottenbach@HS-ZiGr.de, F.Worlitz@HS-ZiGr.de*

## **Kurzfassung**

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde eine konventionell gelagerte Kühlwasserdruckerhöhungspumpe auf vollständig aktive Magnetlagerung umgerüstet und im Zwischenkühlkreislauf eines 500-MW-Kraftwerksblockes als Demonstrationsanlage eingebaut und getestet. Ziel war es, die Eignung von Magnetlagern für den Einsatz an Turbomaschinen im Kraftwerksbetrieb nachzuweisen [1]. Im Anschluss an die Inbetriebnahme-phase erfolgte der Langzeiteinsatz als Betriebspumpe [2]. Nach einer ca. dreieinhalbjährigen Laufzeit wurde die Pumpe einer Revision unterzogen. Dabei wurde der Zustand der Pumpe und speziell der Lagerkomponenten begutachtet. Erforderliche, zustandsabhängig durchzuführende Reparatur- und Wartungsarbeiten der Magnet- und Fanglagerkomponenten sollten den Weiterbetrieb der Pumpe im Kraftwerk sicherstellen. Aus festgestellten Mängeln an Einzelkomponenten sowie aufgetretenen Schwierigkeiten bei der Demontage z. B. infolge Korrosion waren Maßnahmen zu deren Vermeidung abzuleiten. Zudem lassen sich daraus Rückschlüsse für die konstruktive Gestaltung künftiger Anwendungen, einzusetzender Materialien und Anforderungen z. B. an die Wellendichtung ziehen.

Der Beitrag gibt einen Einblick in die Erfahrungen und den Wissenszuwachs, die während der Revision der aktiv magnetgelagerten Pumpe gesammelt wurden.

## **1 Einleitung**

Lagerbedingte Ausfälle von konventionell gelagerten Turbomaschinen in Kraftwerken lassen sich durch den Einsatz von Magnetlagern reduzieren. Des Weiteren bringt der Einsatz von Magnetlagern neben ökonomischen und ökologischen auch sicherheitstechnische Vorteile z. B. durch den Wegfall des kompletten Ölsystems zur Schmierung der Gleitla-

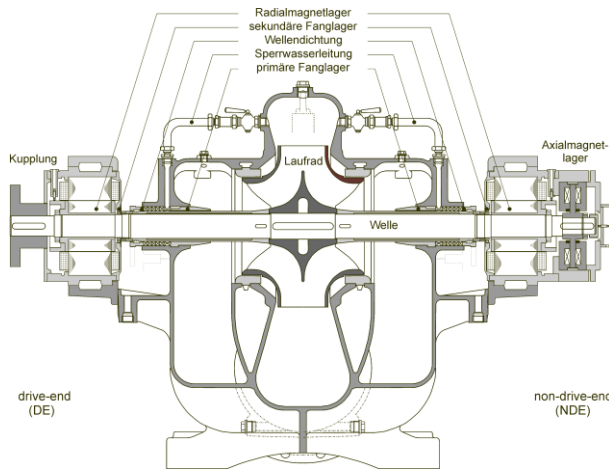
ger und somit der Reduzierung der Brandmasse. Zum Nachweis der Anwendbarkeit von Magnetlagern an Turbomaschinen im Kraftwerkseinsatz wurde eine konventionell gelagerte Kühlwasserdruckerhöhungspumpe auf vollständig aktive Magnetlagerung umgerüstet und in einem 500-MW-Block des Braunkohlenkraftwerkes Boxberg der Vattenfall Europe Generation AG als dritte Kühlmittelpumpe installiert. Nach erfolgreichem Abschluss der Inbetriebnahme erfolgte der Dauereinsatz der Pumpe als Betriebspumpe im normalen Kraftwerksregime. Während dieser Zeit arbeitete die Pumpe stabil; die Magnetlager, die Sensorik und die Leistungs- bzw. Regelelektronik verursachten keinen Ausfall der Pumpe.

Im Rahmen der planmäßigen Hauptrevision des Kraftwerksblockes im Jahre 2009 wurde die magnetgelagerte Pumpe ebenfalls einer Revision unterzogen. Ziel dabei war es, speziell den Zustand der für die Magnetlagerung erforderlichen Komponenten der Pumpe Magnetlager, Sensorik, Fanglager nach einer nahezu dreieinhalbjährigen Laufzeit als Betriebspumpe zu begutachten und zu dokumentieren, evtl. erforderliche Wartungs- bzw. Reparaturarbeiten vorzunehmen und die Pumpe für einen weiteren Einsatz als Betriebspumpe zu ertüchtigen.

## **2 Aktiv magnetgelagerte Kühlwasserdruckerhöhungspumpe SM 400/400**

Abb. 1 zeigt eine Schnittdarstellung der auf aktive Magnetlagerung umgerüsteten Kühlwasserpumpe. Im Kraftwerk wird die Pumpe als Kühlwasserdruckerhöhungspumpe im Nebenkühlkreislauf eingesetzt und versorgt u. a. den Gaskühler des Generators, den Dichtöl-

kühler, den Deionatkühler und den Generatorleistungsschalter.



**Abb. 1:** Schnittdarstellung der Kühlwasserpumpe mit aktiver Magnetlagerung

Die Pumpe ist eine horizontale, einstufige Kreiselpumpe mit Einfachspiralgehäuse. Das Pumpengehäuse ist in der Wellenebene geteilt. Die Lagerböcke sind außerhalb des Pumpengehäuses. Ein Axialschubausgleich wird durch ein doppelflutiges Laufrad realisiert. Die Wellendichtung erfolgt über Stopfbuchspackungen in unmittelbarer Nähe zu den Magnetlagern. Die Pumpe wird über einen polumschaltbaren Elektromotor mit zwei Nenndrehzahlen betrieben. Tab. 1 gibt einen Überblick über die Hauptparameter der Pumpe für beide Drehzahlen.

Parameter	Betrag	Einheit
Nenndrehzahlen	985/1475	U/min
Nennförderstrom	915/1400	m <sup>3</sup> /h
Spezifische Energie	137/319	J/kg
Förderhöhe	14/32.5	m
Wellenleistung	120/180	kW

**Tab. 1:** Hauptparameter der Pumpe SM 400/400

### 3 Einsatz der Pumpe im Kraftwerk

#### 3.1 Pumpbetrieb im Blockregime

Die zur Versorgung der Kühler im Nebenkühlkreislauf erforderliche Kühlwassermenge ist einerseits abhängig von der Außentemperatur und andererseits von der Fahrweise des Kraftwerksblockes und kann durch ein Stellventil reguliert werden. So arbeitet die Pumpe in den warmen Sommermonaten im Ausle-

gungspunkt mit hoher Drehzahl, d. h. mit dem höchsten Wirkungsgrad und den geringsten Lagerbelastungen. In den kalten Wintermonaten wird die Temperatur im Kühlsystem durch eine Drosselung des Förderstromes über das Stellventil konstant gehalten. Diese Reduzierung des Förderstromes führt bei konstanter Motorleistung zu einer Druckerhöhung im System und zu erheblichen Abweichungen vom Nennarbeitspunkt der Pumpe. Die höchsten Drücke und Belastungen der Pumpe treten beim Anfahren gegen den geschlossenen druckseitigen Schieber auf. Zur Entlastung der Pumpe wird diese bei geringen Förderströmen mit der kleinen Drehzahl betrieben, z. B. bei Monoblockbetrieb.

#### 3.2 Auswirkungen der Laständerungen während des Pumpbetriebes

Abweichungen vom Nennarbeitspunkt führen einerseits zur Erhöhung der auf das Laufrad wirkenden Kräfte und somit der Belastungen der Magnetlager [3]. Die Kompensation dieser Belastungen erfolgt in den Magnetlagern durch eine entsprechende Erhöhung der Lagerkräfte, die durch eine Stromerhöhung in den Lagern erzielt wird. Dadurch vergrößern sich die Stromwärmeverluste in den Lagern und bewirken eine Erhöhung der Lagertemperatur bis zur Einstellung einer stationären Temperatur. Die erhöhte Lagertemperatur beeinflusst die Lebensdauer der Lagerkomponenten, speziell der Isolierstoffe, negativ.

Die Drosselung des Förderstromes durch das Regelventil führt andererseits zu einer Druckerhöhung in der Pumpe. Dadurch vergrößern sich die Leckagen an den Wellendichtungen, da das Sperrwasser direkt aus dem Druckraum über die Sperrwasserleitungen zu den Stopfbuchspackungen geleitet wird - vgl. Abb. 1. Die austretenden Sperrwasserleckagen wirken auf die in unmittelbarer Nähe montierten Magnetlager dahingehend, dass über die sekundären Fanglager im Lagerdeckel Leckagen in die Lagergehäuse eindringen. Daneben bewirken höhere Belastungen der Wellendichtungen einen höheren Verschleiß, damit verbunden eine Zunahme der Leckage und eine Verkürzung der Standzeiten der Dichtungen. Eine Abschaltung der Magnetlager in diesem Betriebsregime führt durch den erhöhten

Druck auf das Laufrad zu erhöhten Fanglagerbelastungen und damit einhergehenden Verschleiß.

#### 4 Revision der Pumpe

Zur Revision wurde die Pumpe aus der Anlage ausgebaut. Eine Vor-Ort-Inspektion war nicht möglich, da die Pumpe demontiert werden musste. Abb. 2 zeigt die ausgebaute, für den Abtransport in die Werkstatt vorbereitete Pumpe.

Die Inspektion der Pumpe umfasste die für die Lagerung der Pumpenwelle relevanten Komponenten:

- Lagergehäuse
- Radial- und Axialmagnetlagersensorik
- Radial- und Axialmagnetlageraktorik
- Fanglager
- Pumpengehäuse
- Wellendichtung

Diese Komponenten wurden zustandsabhängig gewartet, repariert bzw. erneuert.



Abb. 2: Magnetgelagerte Pumpe nach dem Langzeiteinsatz aus der Anlage ausgebaut

##### 4.1 Magnetlagergehäuse

Die funktionsbedingt permanent auftretenden Sperrwasserleckagen an den Wellendichtungen führten zu erheblichen Ablagerungen am Lager- und Pumpengehäuse. Diese Ablagerungen setzten Teilfugen zwischen dem Lagergehäuse und den Lagerböcken zu und behinderten die Demontage. Die ständig vorhandene Feuchtigkeit durch das leicht basische Leckagewasser ( $\text{pH} = 8,5$ ) führte im Zusammenwirken mit Luftsauerstoff auch zu erheblichen Korrosionserscheinungen im Einflussbereich. Abb. 3 und Abb. 4 zeigen beispielhaft

Ablagerungen am Lagerdeckel mit sekundärem Fanglager und Lochfraßkorrosion an einem Lagergehäuse.

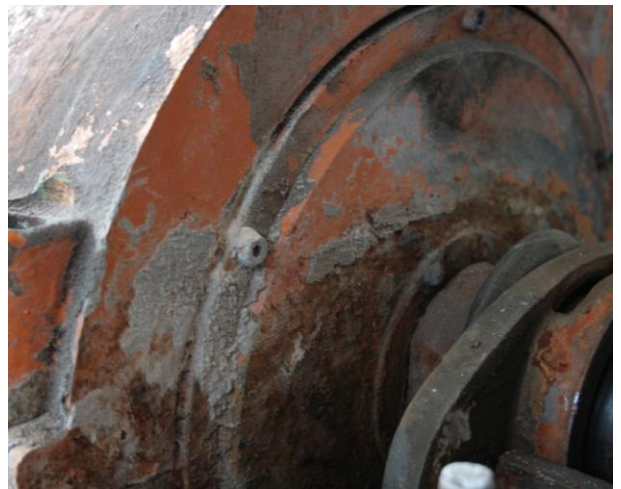


Abb. 3: Ablagerungen an Lagerdeckel und Lagerbügel

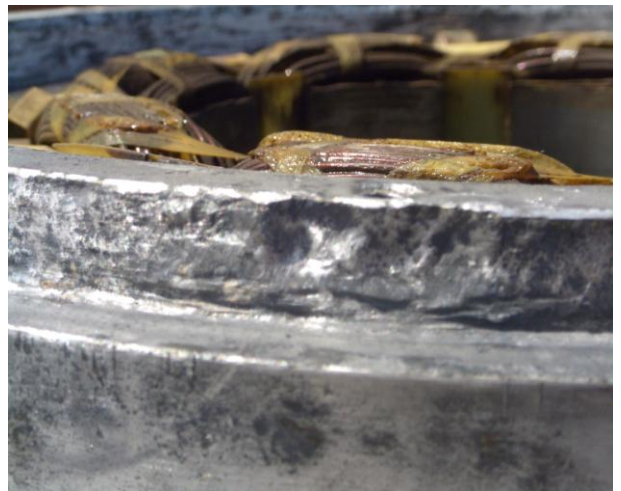


Abb. 4: Lochfraßkorrosion am Lagergehäuse

##### 4.2 Lagesensoren

Die Lagemesssysteme der Magnetlager befinden sich außerhalb des Einflussbereiches der Leckagen in Richtung der Wellenenden. Abb. 5 zeigt das DE-seitige Messsystem zur Bestimmung der radialen Wellenlage bei geöffnetem Lagerdeckel. Je ein Wirbelstromsensor erfasst die Wellenlage in  $x$ - und  $y$ -Richtung.

In Abb. 6 ist der Axialsensor dargestellt. Dieser misst gegen eine am NDE-seitigen Wellenende stirnseitig angebrachte Sensorbahn.





**Abb. 5:** Radiales DE-seitiges Wellenlagemesssystem in x- und y-Richtung



**Abb. 7:** Korrosionsspuren am DE-seitigen Lagerstatorblechpaket infolge Wassereintritts



**Abb. 6:** NDE-seitiger Axiallagesensor



**Abb. 8:** Rostspuren am DE-seitigen Läuferblechpaket

Im Bereich der Messsysteme wurden keinerlei Beeinträchtigungen durch Verschmutzung, Korrosion oder Anstreichungen der Sensoren an den Messspuren festgestellt.

#### 4.3 Radial- und Axialmagnetlager-aktorik

Abb. 7 zeigt den Stator des DE-seitigen Radialmagnetlagers. Deutlich sind im unteren Bereich des Statorblechpaketes Korrosionsspuren infolge von in das Lager eingedrunenem Leckagewasser zu erkennen. In Abb. 8 zeigen Rostspuren an der Oberfläche des Läuferblechpaketes, dass es auch zum Wassereintrag in den Lagerspalt gekommen ist. In beiden Radialmagnetlagern wurde unterschiedlich starke Korrosion festgestellt.

Die unterschiedlich starken Einträge von Leckagewasser in die Radialmagnetlager lassen sich durch die verschieden großen Wellenorbits während des Betriebes erklären, wodurch die Packungen der Wellendichtungen auf der DE- und der NDE-Seite ungleich beansprucht werden und verschleifen. Im NDE-seitigen Radialmagnetlager erfolgt eine wesentlich bessere Zentrierung der Welle als im DELager. Hier wirken infolge der nicht 100%igen Ausrichtung zwischen Pumpe und Antriebsmotor zusätzliche, über die Kupplung eingetragene umlaufende Kräfte, die eine größere Auslenkung der Welle auf der DE-Seite verursachen. Am Axialmagnetlager wurde keine Beeinträchtigung festgestellt. Das eingedrungene Leckagewasser hatte keine Auswirkungen auf die Funktion der Spulensysteme der Lager.

#### 4.4 Fanglager

Das Fanglagersystem an der Pumpe unterteilt sich in die primären und sekundären Radialfanglager und das Axialfanglager. Als primäre Radialfanglager werden die Grundbuchsen als wassergeschmierte Gleitbuchsen verwendet – vgl. Abb. 1. Zur Vermeidung der Berührung von Rotor- und Statorteilen in den Radialmagnetlagern sind in den inneren Lagerdeckeln zusätzliche Rillenkugellager als sekundäre Fanglager integriert. Abb. 9 zeigt die Welle in der Grundbuchse, in Abb. 10 ist das DE-seitige und nicht mehr funktionstüchtige Rillenkugellager zu sehen.

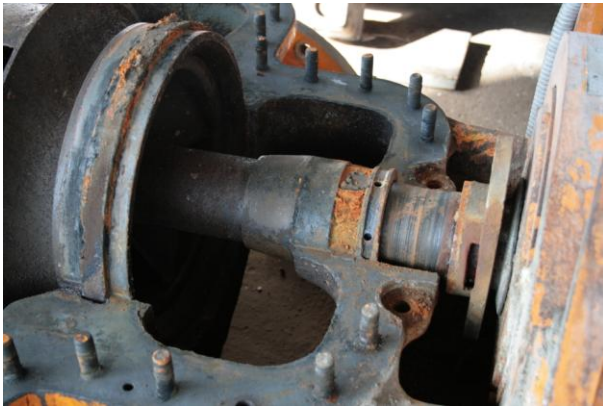


Abb. 9: Grundbuchse als Primärfanglager



Abb. 10: Stark korrodiertes DE-seitiges Rillenkugellager

Messungen an den Grundbuchsen haben gezeigt, dass durch Fanglagereingriffe, hauptsächlich während der Tests in der Inbetriebnahmephase, ein Materialabtrag von ca. fünf- und zwanzig hundertstel Millimeter in beiden Grundbuchsen erfolgte und deren Austausch erforderte. Ebenso machte die fortgeschrittene Korrosion an den Rillenkugellagern einen Ersatz erforderlich.

Die Wellenbewegung wird in axialer Richtung durch in die Ringmagnete des Axialmagnetlagers integrierte Anlaufringe begrenzt. Dadurch wird ein Anstreifen der Spurscheibe an den Ringmagneten verhindert. Abb. 11 zeigt den DE-seitigen Anlaufring des Axialmagnetlagers.



Abb. 11: Anlaufring im Axialmagnetlager mit Abrieb

#### 4.5 Wellendichtung und Pumpengehäuse

Im Laufe der Betriebszeit kam es zu immer stärker werdenden Leckagen an den Wellendichtungen, die weder durch Nachspannen der Stopfbuchsbrille noch durch Neuverpackung reduziert werden konnten. Ursache dafür war der betriebsbedingte Verschleiß im Bereich der Wellendichtungen. An den Wellenhülsen kam es aufgrund der ständigen Reibung zwischen Hülse und Packung zu Materialabtrag, wie an den Einlaufspuren zwischen Grundring und Stopfbuchsbrille rechts in Abb. 9 ersichtlich ist.



Abb. 12: Verschleiß im Bereich der Stopfbuchspackung am Pumpendeckel



In Abb. 12 sind Korrosions- und Einarbeitungsspuren im Stopfbuchsraum des Lagerdeckels zu erkennen, welche die Oberflächenrauigkeit in diesem Bereich erhöhten und zu Leckagen zwischen Packung und Lagerdeckel führten.

## 5 Instandsetzung und Überarbeitung der Pumpe

### 5.1 Magnetlagergehäuse

Die an den Lagergehäusen haftenden Ablagerungen und Korrosionsrückstände wurden entfernt und betroffene Stellen mit Korrosionsschutzfarbe versehen - Abb. 13.



Abb. 13: Aufbereitetes Lagergehäuse

In die Lagerdeckel wurden in den unteren Bereichen Ablaufbohrungen eingebracht. Diese sollen verhindern, dass in die Gehäuse eintretendes Sperrwasser längere Zeit in den Lagern steht - Abb. 14.



Abb. 14: Lagerdeckel mit Ablaufbohrung

### 5.2 Radialmagnetlager

Die an den Deckblechen der Blechpakete vorhandenen Korrosionsspuren wurden entfernt und anschließend mit Schutzlack versehen,

vgl. Abb. 15. Die Rostspuren in den Bohrungen der Statorblechpakete als auch an den Rotorblechpaketen wurden abgeschmirgelt und mit Elektrolack versiegelt. Die Wickelköpfe und Nuträume wurden durch Ausblasen von losem Schmutz und Staub gereinigt.



Abb. 15: Aufbereiteter Radialmagnetlagerstator

Die Spulen waren während des Dauerbetriebes neben mechanischen und thermischen Belastungen der eingedrungenen Feuchtigkeit ausgesetzt. Zur Prüfung des Zustandes der Feldspulen wurden die Wicklungswiderstände gemessen und eine Isolationsprüfung der Wicklungen untereinander und gegen das Stator-eisenpaket durchgeführt. Es wurden keine Fehler festgestellt.

Die zur Befestigung der Radiallagerrotoren verwendeten Nutmuttern wurden auf Grund der Abnutzung an den Nuten erneuert, zudem wurde dabei die Verdrehsicherung durch Gewindestifte von ursprünglich radialer auf axiale Wirkrichtung geändert. Dadurch kommt es nicht mehr zur Beschädigung des Gewindes auf der Welle.

### 5.3 Axialmagnetlager

Eine Überarbeitung der Lagerteile war nicht erforderlich, jedoch musste eine Bruchstelle im Spiralschutzschlauch einer Zuleitung repariert werden.



Abb. 16: Defekter Spiralschutzschlauch

#### 5.4 Primärfanglager - Grundbuchsen

Der Verschleiß an den als Primärfanglager genutzten Grundbuchsen erforderte den Austausch durch neu gefertigte Grundbuchsen. Außerdem wurden die Aufnahme der Buchsen und der Bereich der Wellendichtungen im Lagergehäuse neu ausgebucht. Damit wurde der ursprünglich vorhandene Versatz zur geometrischen Mitte der Rotationsachse in diesen Bereichen behoben, wodurch die Grundbuchsen konzentrisch gefertigt werden konnten. Abb. 17 zeigt das vormontierte Laufzeug, gelagert in einer neu gefertigten Grundbuchse.



Abb. 17: Laufzeug in neuer Grundbuchse

#### 5.5 Sekundärfanglager - Kugellager

Beide als Sekundärfanglager eingesetzte Rillenkugellager wurden durch neue vom Typ 61816-2RSR-Y ersetzt. Ebenso wurde der stark verschlissene A-seitige Anlaufring durch einen neu gefertigten ausgetauscht. Die Lagerdeckel wurden überarbeitet und mit Korrosionsschutz versehen. Die zur Befestigung der Deckel am Lagergehäuse verwendeten Schrauben mit Innensechskant wurden zur besseren Demontage durch Sechskantschrauben ausgetauscht.

#### 5.6 Axialfanglager

Zur Bestimmung des Ausmaßes des Abriebs an den Anlaufringen wurden diese mit einer Bügelmessschraube vermessen und mit den Ist-Maßen der Fertigungszeichnungen verglichen. Die Messergebnisse zeigen, dass die Ist-Maße unwesentlich vom unteren Toleranzmaß abweichen. Im ungünstigsten Fall beträgt die max. Abweichung vom Sollwert auf der A-Seite acht und auf der B-Seite sechs hundertstel Millimeter. Im Ergebnis dessen war kein Austausch der Anlaufringe erforderlich.

#### 6 Montage und Wiederinbetriebnahme der Pumpe in der Anlage

Nach erfolgter Revision der Pumpe wurde diese montiert und wieder in die Anlage im Kraftwerk eingebaut. Danach erfolgte die Neujustierung der Lagesensoren. Das war erforderlich, da sich durch das Ausbuchen der Grundbuchsbereiche und die neuen Grundbuchsen die Geometrie innerhalb der Pumpe wesentlich geändert hatte. Dabei wurde kein freies Fenster innerhalb der Fang- und Magnetlagerung gefunden. Ursache war eine erhebliche Deformation der Welle, die nur durch eine Neufertigung der Welle behoben werden konnte. Daher wurden die Pumpe wieder aus der Anlage ausgebaut und demontiert. Nach Fertigung der Welle und Montage des Laufzeugs wurden umfangreiche Vermessungen zur Sicherstellung der Übereinstimmung von mechanischer und magnetischer Mitte vorgenommen. Dabei wurde eine Abweichung der Dichtungsringe zur mechanischen Mitte festgestellt. Ursache dafür sind die in diesem Bereich stark verschlissenen Auflageflächen in Pumpengehäuseunterteil. Die Ausrichtung der Dichtungsringe erfolgte durch Unterfütterung mit Fühlerlehrenband entsprechender Stärke. Nach der Montage der Pumpe und Einbau in die Anlage wurde die Sensorik neu justiert und die Pumpe am 17. August 2011 als Betriebspumpe wieder in Betrieb genommen - vgl. Abb. 18.



**Abb. 18:** Pumpbetrieb mit Förderdruck von ca. 4,7 bar

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die magnetgelagerte Kühlmittelpumpe war während des dreieinhalbjährigen Langzeitbetriebes den Umgebungs- und Betriebsbedingungen im Kraftwerk ausgesetzt. Die bei der anschließenden Revision festgestellten Beeinträchtigungen im Bereich der Magnetlager resultierten im Wesentlichen aus Ablagerungen und Korrosion durch das Leckagewasser der Wellendichtungen, führten aber zu keiner Funktionsstörung bzw. zum Ausfall der Magnetlagerung. Die Magnetlagerkomponenten wurden überarbeitet und mit einem Korrosionsschutz versehen. Die einem mechanischen Verschleiß unterliegenden Komponenten Fanglager und der Wellendichtungen wurden erneuert bzw. überarbeitet. Damit wurde die Pumpe für einen weiteren Langzeiteinsatz ertüchtigt.

Aus den Ergebnissen der Revision lassen sich folgende Schlussfolgerungen für künftige Anwendungen ziehen:

Im Hinblick auf die Konstruktion ist die Beeinträchtigung von Leckagen auf die Magnetlager durch geeignete Maßnahmen, z. B. eine Kapselung der Magnetlager oder die Verwendung leckagearmer Dichtungen (z. B. Gleitringdichtungen) auszuschließen. Im Fall des Einsatzes bei aggressiven Medien sollten für die Lagergehäuse korrosionsfeste Materialien gewählt werden. Beim Design der Magnetlager für die Pumpe war die Aggressivität des Kühlmediums nicht vorhersehbar und wurde unterschätzt.

Mit dem Langzeiteinsatz der magnetgelagerten Pumpe wurde nachgewiesen, dass Magnetlager grundsätzlich für Turbomaschinen im

Kraftwerk geeignet sind. Künftig wird die Pumpe weiter als Betriebspumpe eingesetzt, aber auch für Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Sensorik und Regelelektronik genutzt.

## Literatur

- [1] F. Worlitz, S. Gärtner, T. Rottenbach: Completely active magnetic supported coolant pump for application in power stations ISMST 8, Dresden, Germany, 2005
- [2] F. Worlitz, T. Rottenbach: Long-term operation of an AMB-supported coolant pump in a lignite power station – results and operational experience ISMB 11, Nara, Japan, 2008
- [3] F. Worlitz, T. Rottenbach: Determination of forces on a completely active magnetic supported coolant pump in a power station ISMB 10, Martigny, Switzerland, 2006