

Mech. Eng. Paulo Pereira, Mech. Eng. Peter Schmitt, Dipl.-Ing. Kamran Riahi und Mech. Eng. Martin Müller-Brodmann, Stadtallendorf

Selbstschmierende Gleitlager in der Laufradnabe von Kaplan-Turbinen

Einleitung

Die Lagerung des Laufrades in Kaplan-Turbinen erfolgt klassischerweise mit gegossenen Bronzegleitlagern, die eine Schmierung benötigen. Bisher diente häufig eine unter Druck stehende Ölfüllung der Laufradnabe dazu, den einwirkenden Wasserdruck auszugleichen und den erforderlichen Schmierfilm zwischen Gleitlager und Welle zu gewährleisten.

Allerdings besteht bei dieser Lösung stets die Gefahr, dass im Verlaufe der typischerweise langen Turbinenbetriebszeiten Dichtungen versagen, sodass Schmieröl austreten und in das Flusswasser gelangen kann. Als kritisch gelten hier vor allem die Dichtungen der Schaufelzapfen in der Nabe [1]. In über 60% aller Fälle erwiesen sie sich in einer Studie der Columbia Power Corporation in Zusammenarbeit mit CEATI (Canadian Electricity Association Technologies Incorporated) als Ursache für den Ölaustritt in Kaplan-Turbinen [2]. Aus ökologischen Gründen erscheint dieses Risiko schwer tragbar, zumal eine Ölkontamination kaum vereinbar ist mit dem guten Ansehen von Wasserkraftwerken als erneuerbare Energiequelle.

Daher wird die Ölschmierung zusehends aufgegeben und entweder durch Wasser-schmierung oder Trockenlauf ersetzt. Damit ist zwar die Gefahr einer Ölkontamination des Wassers gebannt, aber die korrosive Wirkung von Wasser in Verbindung mit seiner geringen Viskosität stellt veränderte Anforderungen an die Gleitlager. Trockenlauf wiederum erfordert ohnehin spezielle Gleitlager. Der vorliegende Beitrag stellt die Ergebnisse von 30 Jahren erfolgreichem Einsatz selbstschmierender Gleitlager aus dem Werkstoff deva.bm[®] vor, der sich inzwischen auch in zahlreichen Kaplan-Turbinen weltweit bewährt.

Gleitlagertechnik

Da die Tribologie ein sehr spezieller Wissensbereich ist, sollen einige Vorbemerkungen

dazu dienen, die folgenden Ausführungen zu verdeutlichen. Gleitlager bestehen aus dem eigentlichen Lager, das gemeinsam mit der Gegenlauffläche (hier der Welle) ein tribologisches System bildet. Dessen Verhalten ist von zahlreichen Einflussgrößen abhängig und reagiert sensibel auf Wechselwirkungen unterschiedlicher Parameter. Zu den wichtigsten für Wasserkraftanwendungen zählen die Oberflächenbeschaffenheit der Welle (Rauheit, Werkstoff), die Gleitgeschwindigkeit, die Oszillation, das verwendete Schmiermittel, die Bemessung des Lager-spalts, eventuelle Fluchtungsfehler zwischen Welle und Lager, die Anwesenheit korrosiver oder abrasiver Bestandteile im Lagerspalt sowie die Zahl der Anlaufsituationen aus dem Wellenstillstand beziehungsweise die Zahl der Stellvorgänge an den Laufradschaufeln.

Die hohe Zuverlässigkeit gut ausgelegter Gleitlager mit dem richtigen Lagerwerkstoffsystem für den Einsatzfall resultiert aus dem besonders beschaffenen Schmierfilm, der sich zwischen der Lagergleitfläche und der Oberfläche des Laufpartners ausbildet. Sobald sich dieser Film gebildet hat, findet ein optimierter Festkörperkontakt zwischen den Reibpartnern statt, was Reibung und Verschleiß minimiert.

Das Werkstoffsystem deva.bm[®]

Von außen nach innen betrachtet, bestehen deva.bm[®]-Gleitlager aus zwei metallischen Komponenten: Ein rostfreier Stahlrücken gibt dem Lager seine mechanische und dimensionale Stabilität. Auf diesem Stahlrücken befindet sich eine Sinterbronzegleitschicht mit eingelagerten Festschmierstoffpartikeln. Die Gleitschicht wird durch ein Walz-Sinterverfahren auf dem Rücken aufgebracht und mit ihm mikroverklammert. Als Festschmierstoff stehen alternativ Grafit (z. B. deva.bm[®] 342) oder PTFE (deva.bm[®] 362/9P) zur Verfügung. Die Festschmierstoffe sind homogen im Gefüge der Bronzematrix verteilt.

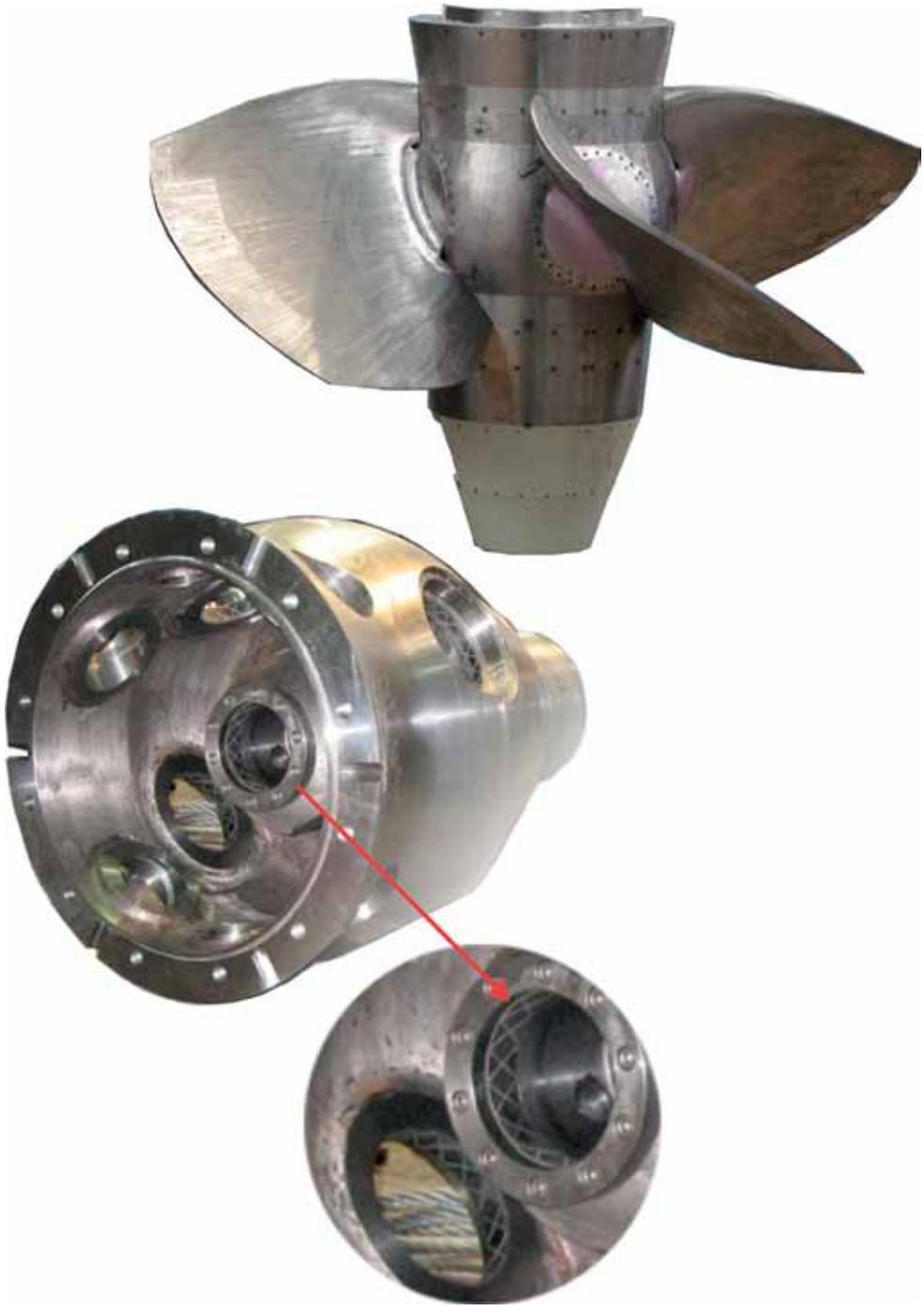


Abb. 1: Laufrad einer Kaplan-Turbine mit Lagerstellen, an denen das Gleitlagersystem deva.bm[®] zum Einsatz kommt.

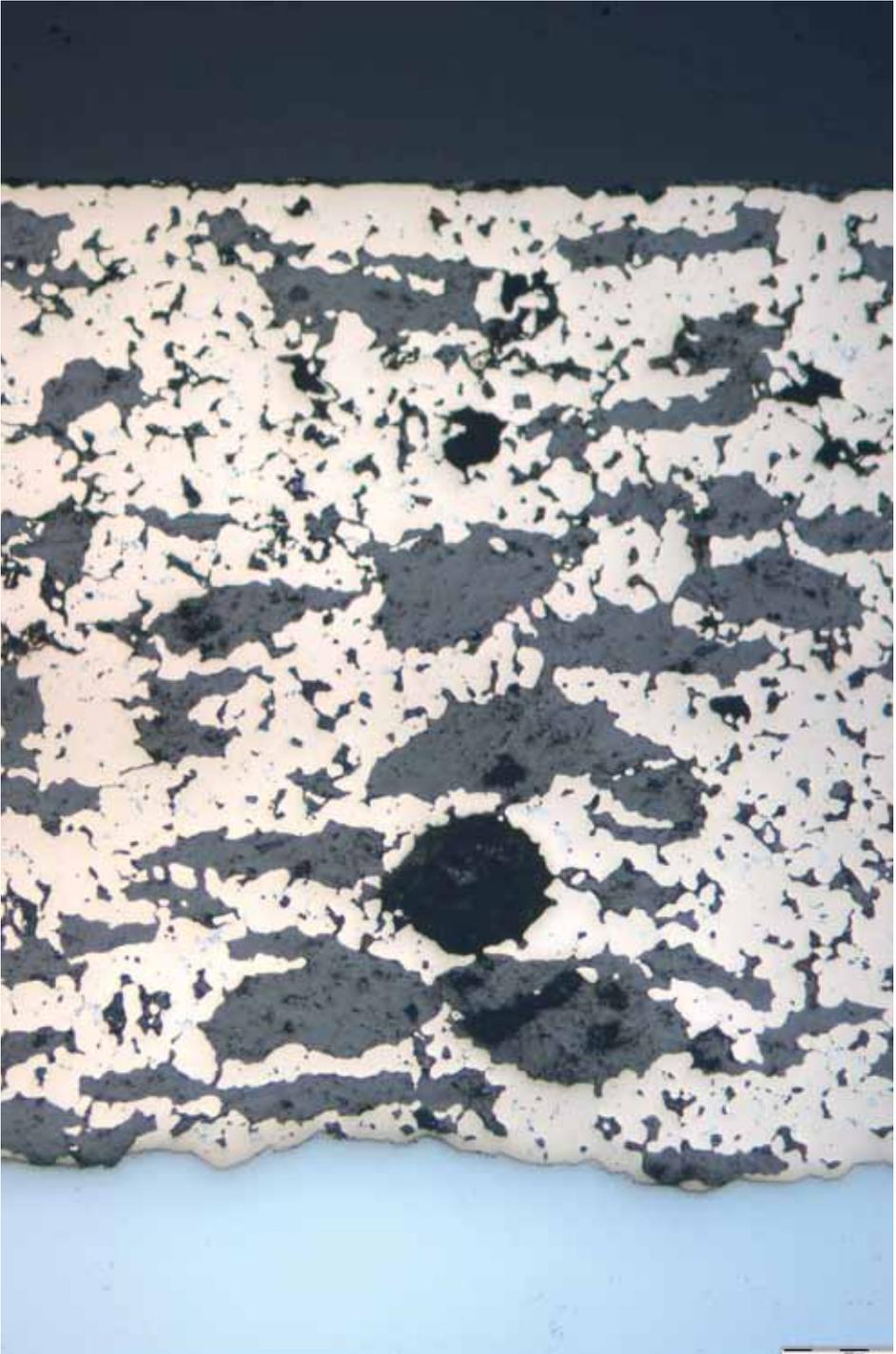


Abb. 2: Mikroschliffbild der Sinterbronzematrix von deva.bm® 342 mit dem homogen eingebetteten Festschmierstoff

Je nach Anwendung kann die Sinterbronzegleitschicht mit einer zusätzlichen Einlaufschicht versehen werden, die am Anfang des Betriebes kontrolliert und gewollt auf die Gegenauflfläche übertragen wird und somit die anfängliche Reibung und den Verschleiß zwischen den Reibpartnern senkt. Im Regelbetrieb (nach der Einlaufphase) entsteht die Selbstschmierung des Lagers dadurch, dass Festschmierstoffpartikel an der Gleitfläche aktiviert werden, sobald diese im Betrieb und unter Last Kontakt mit der Gegenauflfläche bekommt. Dabei wird Festschmierstoff auf die Gegenauflfläche übertragen und bildet dort einen Transferfilm rund um die Welle.

Kriterien für die Eignung im Anwendungsfall Kaplan-Turbine

Für den Einsatz in Kaplan-Turbinen bietet das Betriebsverhalten dieser Lager eine Reihe von spezifischen Vorteilen:

- Dazu zählt eine Verminderung der Reibung zwischen Welle und Lager. Damit einhergehend sinkt auch der Bedarf an hydraulischer Energie zur Verstellung der Schaufeln.
- Die Lebensdauer der Lager steigt dank der niedrigeren Verschleißrate.
- Beide Festschmierstoffe (Grafit und PTFE) sind unempfindlich gegenüber katalytischen Effekten, die von der Materialkombination Lagermetall/Gegenlaufwerkstoff ausgelöst werden können. Kohlenwasserstoffe im Öl oder Schmierfett dagegen werden hiervon beeinflusst.
- Die Schaufeln von Kaplan-Turbinen arbeiten nur innerhalb einer relativ konstanten Betriebsfrequenz.
- Typischerweise sind die Schaufeln sehr schwer und können je nach Turbinengröße mehrere Tonnen wiegen. Hinzu kommen erhebliche radial einwirkende Lasten, die von der zentrifugalen Beschleunigung im Betrieb verursacht werden. Mit ihrem hohen Elastizitätsmodul (E-Modul = Maß der Steifigkeit) verringern Gleitlager aus deva.bm® Fehlstellungen der Schaufelzapfen im Betrieb.
- Bei ölgefüllten Naben kann man aus den geschilderten Betriebsbedingungen ableiten, dass während der Verstellung der

Schaufeln nicht unbedingt ein ausreichend stabiler Ölfilm gewährleistet ist. Wegen der hohen Kräfte, die auf die Baugruppe Schaufelzapfen/Lager einwirken, kann es daher zu einer Mischreibung mit Festkörperkontakt kommen, ohne dass Festschmierstoffe vorhanden sind. Folgen davon sind Fressen und hoher Schichtverschleiß, die letztlich zu erhöhter Reibung führen. Während Öl zu Beginn der Schaufelverstellung keine ausreichende Schmierung gewährleistet, bewirkt der Festschmierstoff in der Matrix des deva.bm® auch unter erhöhter Last eine angemessene Schmierung.

- Bei ölfreien Kaplan-Turbinen mit Wasser-schmierung oder Trockenlauf ist der Einsatz von selbstschmierenden Lagerwerkstoffen unumgänglich, weil die Laufpartner Lager/Welle hier zwingend eine wirkungsvolle zusätzliche Form der Schmierung erfordern.
- Insgesamt steigt die Verfügbarkeit der Kaplan-Turbine, weil keine spontan auftretenden Fehler mehr drohen.

Diese Eigenschaften haben einen Turbinenhersteller dazu veranlasst, andere Arten nicht-metallischer Gleitlager mit weichen selbstschmierenden Werkstoffen nicht für den Einsatz bei Schaufelzapfen zu empfehlen, weil das niedrige E-Modul zu Fehlstellungen der Zapfen und zum Ölaustritt führen kann [3].

Werkstoffprüfung

Um die Auswahl und den Einsatz geeigneter selbstschmierender metallischer Gleitlagermaterialien für Kaplan-Turbinen abzusichern, wurde das Betriebsverhalten von deva.bm® 342 und deva.bm® 362/9P ausführlich getestet. Bei den Untersuchungen auf den Prüfständen in Stadallendorf (Abb. 4) wurde geklärt, welchen Einfluss der eingebettete Festschmierstoff hat, wie sich das in der Turbine genutzte Schmiermedium (Öl, Wasser, Wasser mit Korrosionshemmer, Luft) auswirkt, und welchen Einfluss Rahmenbedingungen wie Last, Schaufelzapfenwerkstoff, Rauigkeit des Zapfens, Maßtoleranzen im Einbauzustand und andere mehr haben.

Gemeinsam mit der Voith Hydro GmbH wurde ein spezielles Testprotokoll entwickelt, das den Lagerbetrieb in einer Kaplan-



Abb. 3: Obwohl selbstschmierende Gleitlager in ölgefüllten Laufnaben oft als unnötig gelten, hat Federal-Mogul Deva immer wieder bei Instandsetzungsprojekten Spuren deutlich erhöhter Reibung und von Verschleiß durch Mischreibung und/oder Festkörperkontakt gefunden. Bei dem gezeigten Beispiel hatte sich das alte Bronzelager deshalb in der Aufnahme bewegt.

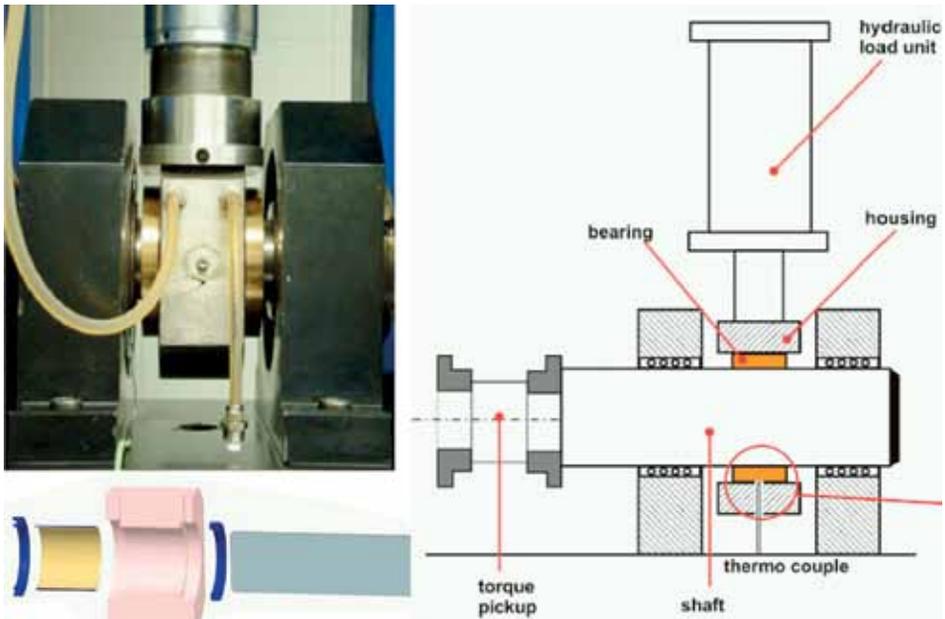


Abb. 4: VRP2-Prüfstand in Stadallendorf für den Test der Gleitlager

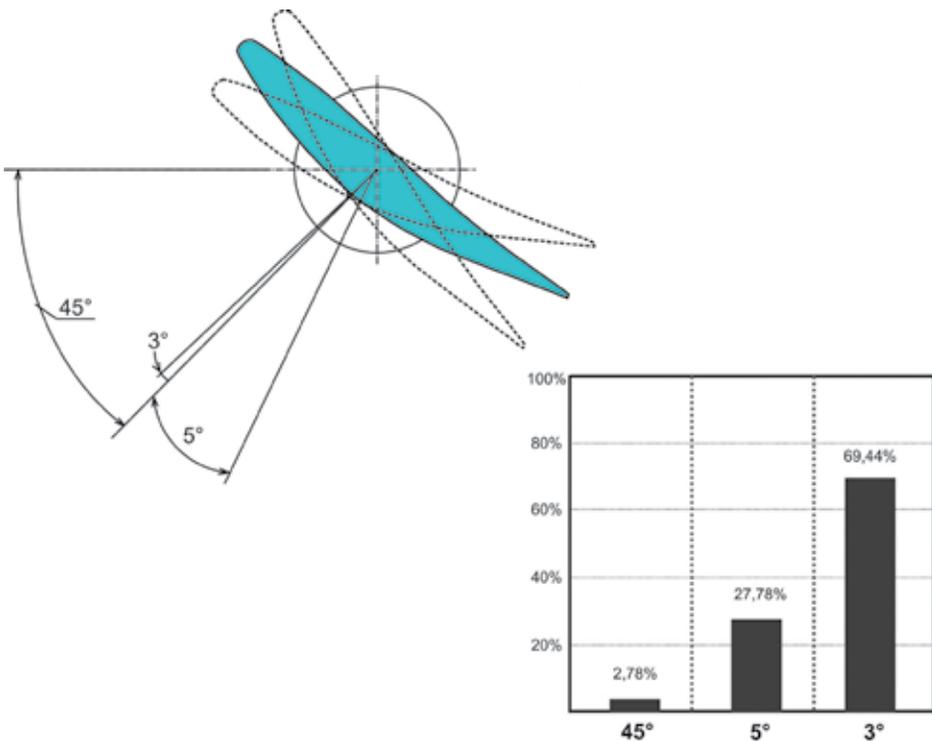


Abb. 5: Bewegungsmuster und Schwenkzyklen (3°, 5° und 45°) für den Test der Gleitlager unter den typischen Bedingungen an den Zapfen der Laufradschaufeln

Turbine realitätsnah auf dem Prüfstand simuliert. Vor allem die Verstellung der Laufschaufeln war dabei von zentralem Interesse, weil hier wegen der genannten Vorgänge hohe Lasten, Mischreibung und Verschleiß auftreten können.

Typisch für das Bewegungsmuster der Schaufelzapfen ist eine oszillierende Schwenkbewegung, die wegen der begrenzten überstrichenen Fläche hohe Anforderungen für Gleitlager bedeuten kann. Aus dem tatsächlichen Betrieb von Kaplan-Turbinen ließen sich drei unterschiedliche Schwenkradien (Abb. 5) ableiten: 3°, 5° und 45°. Ein Testzyklus bestand aus folgenden Abläufen:

- 100 Schwenkzyklen mit +/- 45°,
- anschließend 10 Minuten Pause,
- 1000 Schwenkzyklen mit +/- 5°,
- anschließend 10 Minuten Pause,
- abschließend 2500 Schwenkzyklen mit +/- 3°.

Durch Wiederholung dieses Testzyklus wurden insgesamt etwa 60000 Schwenkzyklen in einem Test erreicht.

Vier Testreihen dienten dazu, die deva.bm®-Gleitlager jeweils mit Öl, Wasser, Wasser plus Korrosionsschutz und im Trockenlauf zu erproben. Die Welle wurde vor jedem Testlauf konditioniert, sodass stets gleiche Voraussetzungen gegeben waren. Während der Testläufe wurde die Temperatur in einem Betriebsbereich zwischen 15° C und 35° C konstant gehalten.

Abb. 6 zeigt die gemessenen Werte des Gleitreibungskoeffizienten (COF).

Wassergeschmierte Laufnaben in Kaplan-Turbinen

Wegen der korrosiven Wirkung von Wasser als Schmiermittel wird dem Schmierwasser in der Regel ein Korrosionsschutz hinzugefügt. Da hier prinzipiell Wechselwirkungen mit dem Festschmierstoff möglich sind, muss die Auswahl der Korrosionsschutzchemie sorgfältig erfolgen. Idealerweise sollte dies in enger Abstimmung zwischen Turbinenhersteller, Hersteller des Korrosionsschutzes und dem Gleitlagerlieferanten erfolgen.

Die Firma Federal-Mogul Deva, Stadtallendorf, hat bereits etliche Testreihen über die

Auswirkungen von Wasser und Korrosionsschutz mit unterschiedlichen Kunden durchgeführt, zu denen auch Hersteller verstellbarer Schiffspropeller gehören.

Gemeinsam mit einem Turbinenhersteller erfolgte kürzlich auch eine Untersuchung für den Einsatz von Kaplan-Turbinen. Dabei zeigte sich, dass die Wirkung des Korrosionsschutzes auf den Verschleiß und den COF-Wert im Vergleich zu einem mit reinem Wasser geschmierten System zu vernachlässigen war. Eine solche Lösung mit Wasser plus Korrosionsschutz ist also eine sinnvolle technische Option.

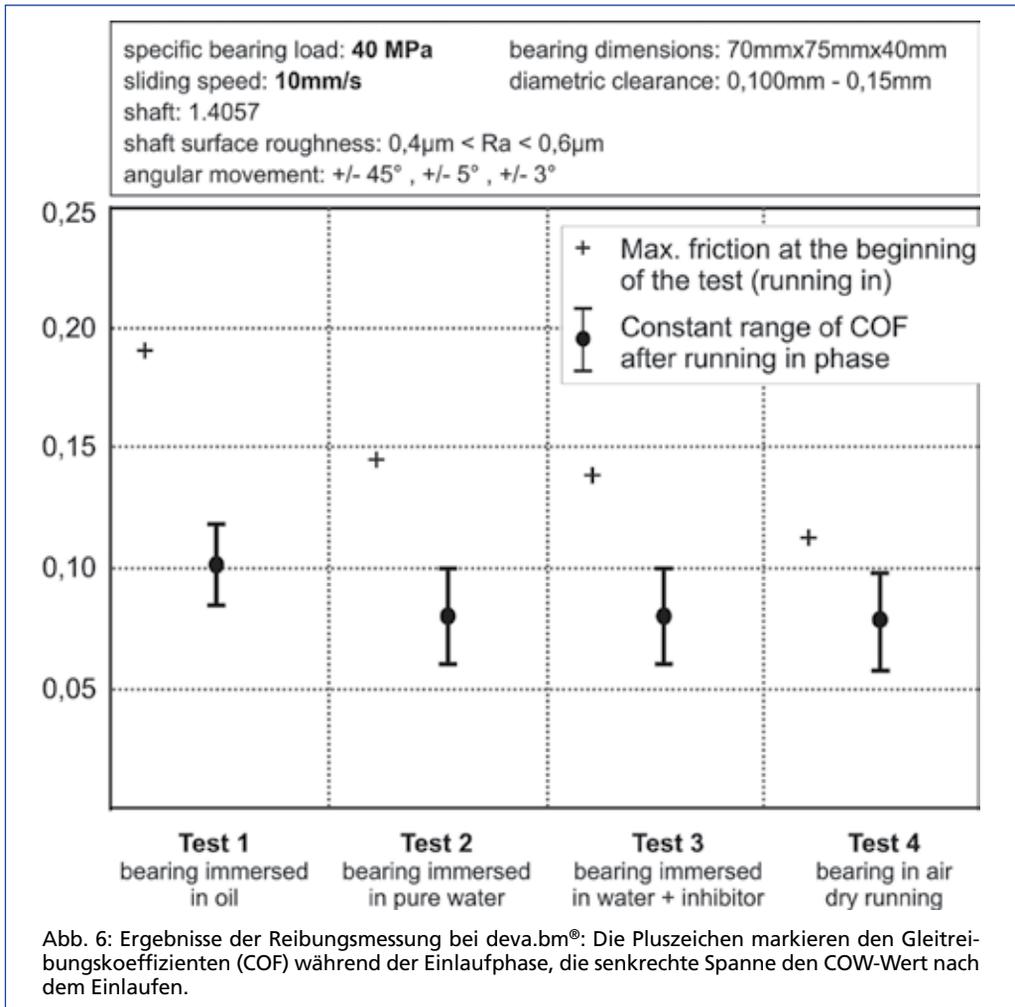
Einsatz bei trocken laufenden Naben

Es mag auf den ersten Blick erstaunen, dass selbstschmierende Gleitlager aus deva.bm® gerade im Trockenlauf die besten Gleiteigenschaften in einer Kaplan-Turbine zeigen. Insbesondere der niedrige COF-Wert während der Einlaufphase (vgl. Abb. 6) erklärt sich dadurch, dass hier weder Öl noch Wasser den Transfer des Festschmierstoffes auf die Gegenlauffläche beeinträchtigen. Hierin spiegelt sich wider, dass deva.bm®-Gleitlager ursprünglich für den Trockenlauf entwickelt wurden und sich unter dieser Einsatzbedingung seit Jahrzehnten bewähren. CKD Blansko setzt deva.bm® 362/9P daher seit über zehn Jahren erfolgreich als trocken laufendes Lager in Kaplan-Turbinen ein.

Zusammenfassung

Für die Erzeugung von Strom aus Wasserkraft spielt der Umweltschutz ebenso eine wachsende Rolle wie in anderen Bereichen der Energiebranche. Da Wasserkraft gemeinhin als besonders saubere Energieform gilt, ist die Messlatte für den Umweltschutz hier wegen der Rolle als „grüne Vorzeigetechnologie“ vermutlich besonders hoch.

Kaplan-Turbinen erfordern daher umweltschonende Lösungen zur Schmierung der Laufnabe. Selbstschmierende Gleitlager aus deva.bm® können dazu einen Beitrag leisten, da sie sich in Öl, mit Wasserschmierung (und mit Wasser plus Korrosionsschutz) sowie im Trockenlauf seit vielen Jahren bewähren und eine hohe Betriebssicherheit und Verfügbarkeit der Anlagen ermöglichen.



Literatur

1. Falkenheim, R., N. Nakagawa and D. Havard: Technologies for Eliminating Oil in Kaplan Turbines. – www.hydroworld.com/index/display/article-display/5491603030/articles/hydro-review-worldwide/Volume-18/issue-6/articles/turbine-mechanical-components/technologies-for-eliminating-oil-in-kaplan.html
2. Stevenson, A., and S. Street: Living with Kaplan in the age of environment. – HydroVision International Conference, Sacramento, CA, July 14–18, 2008
3. Labrecque, G., S. Roy and B. Delisle: Rehabilitation of Kaplan Units with Environmental Considerations at Markham Ferry. – Waterpower Conference XVI, July 27–30, Spokane, WA, USA, 2009

www.wasserkraft-und-energie.de




Wasserkraftanlagen über
 Eisemann, Hans-Morper-Straße 71,
 D-96052 Bamberg, Tel. 0951 1324365
 Hydrohrom, Strzenec 1,
 CZ-257 51 Bystrice, Tel. 00420 317 793773
www.hydrohrom.cz www.wasser-u-strom.de