



Eine neue Herausforderung für Hydraulikzylinder

Erneuerbare Energie aus Oyster-Wellenkraftwerken

Ingo Rühlicke, Matthias Haag

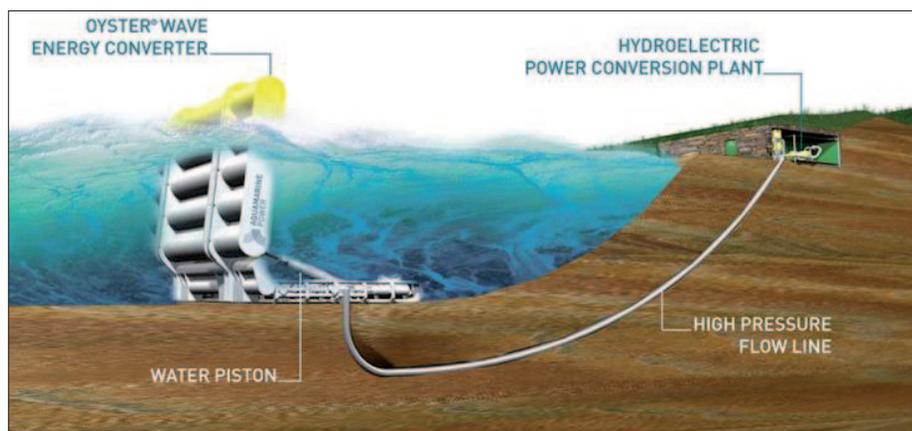
Eine sehr effiziente Methode, um Wellenenergie in küstennahen Gebieten zu gewinnen, ist die Nutzung der kraftvollen, horizontalen Bewegungen von Wellen. Das Oyster-Wellenkraftwerk, welches auf dem Meeresboden installiert ist, verfügt über eine 12 m x 26 m große, vertikal angebrachte Klappe, die durch die horizontalen Wellenbewegungen vor und zurück bewegt wird. Zwei Hydraulikzylinder sind mit der beweglichen Klappe verbunden und pumpen ein wasserbasiertes Hydraulikfluid über Rohrleitungen an eine Station auf dem Festland. Diese Station verfügt über eine Pelton-Turbine mit angekoppeltem Generator mit einer Nennleistung von 800 kW.

Autoren: Dr.-Ing. MBA Ingo Rühlicke, Walter Hunger GmbH & Co. KG, Hydraulikzylinderwerk, 97816 Lohr am Main, Dipl. Ing. Matthias Haag, Aquamarine Power Ltd., 3DX Edinburgh, Großbritannien

Für die Hydraulikzylinder sind der dauerhafte Einsatz im Seewasser sowie die Verwendung von auf Wasser basierendem Hydraulikfluid eine sehr spezielle Herausforderung. Die angestrebten 25 Millionen Zyklen zwischen den geplanten Serviceeinsätzen repräsentieren sehr gut die hohe Anforderung an die Zuverlässigkeit des kompletten Systems. Um die Zylinderkonstruktion an diese Anforderungen anzupassen, wurden modifizierte Dicht- und Führungselemente, die Hunger-Ultraplate-Kolbenstangenbeschichtung sowie ein Edelstahl-Innenliner für die Zylinderbohrung eingesetzt. Parallel zur Konstruktions- und Produktionsphase wurde ein Versuchsstand für die Dicht- und Führungselemente hergestellt, welcher Millionen von Zyklen absolviert hat, um die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Dichtungen unter simulierten Einsatzbedingungen zu testen.



1: Oyster 1 in Betrieb beim European Marine Energy Centre (EMEC)



2: Prinzip von Oyster

Oyster – Das Wellenkraftwerk

Aquamarine Power ist ein Unternehmen im Bereich der Wellenenergienutzung mit Hauptsitz in Edinburgh, Schottland. Das Unternehmen entwickelt aktuell seine Flaggschiff-Technologie, einen hydro-elektrischen Wellenenergie-Transformator, bekannt als Oyster. Das Ziel von Aquamarine Power ist der Aufbau kommerzieller Oyster-Wellenenergiefarmen auf der ganzen Welt und die generelle Etablierung der erneuerbaren Meeresenergie.

Das Unternehmen hat beim Europäischen Meeres Energie Zentrum (EMEC European Marine Energy Centre) im August 2009 erfolgreich einen Prototyp in Originalgröße, genannt Oyster 1, mit einer Nennleistung von 315 kW installiert. Dieser Prototyp war im Oktober 2009 der weltweit erste küstennahe Wellenergieerzeuger, welcher netzgekoppelt elektrischen Strom eingespeist hat. Der Oyster-1-Prototyp hatte eine Nutzungsdauer von zwei Jahren und wurde 2011 stillgelegt (**Bild 1**).

Das Prinzip von Oyster basiert auf einer großen, schwenkbaren und aufschwim-

menden Klappe, dem Oszillator, welcher die komplette Wassertiefe vom Meerboden bis zur Oberfläche abdeckt (**Bild 2**). Typischerweise ist er in 12 bis 20 m Wassertiefe installiert, um die dort herrschenden, starken Brandungswellen zu nutzen. Die Wellen bewegen den Oszillator wie ein am Boden befestigtes Pendel, das sich um bis zu 180° bewegen kann. Der Oszillator ist mit zwei Hydraulikzylindern verbunden, welche die Schwingbewegung in einen Förderstrom umwandeln. Durch eine Fernleitung wird das Hydraulikfluid an Land gepumpt und dort mit Hilfe einer Pelton-Turbine und einem Generator in elektrische Energie umgewandelt.

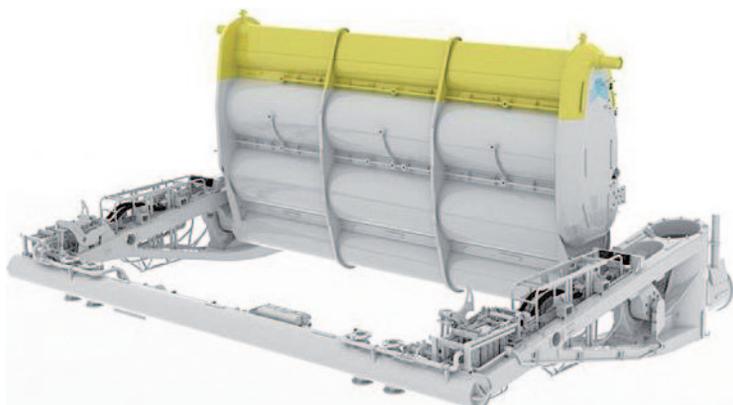
Oyster 1 hat bisher etwa 6000 Stunden erfolgreich vor der Küste gearbeitet bevor es stillgelegt wurde. Die Leistung wurde sorgfältig überwacht und das Ergebnis des Testfloss in die Konstruktion der nächsten Generation ein, dem Oyster 800.

Eine Herausforderung die während des Betriebs von Oyster 1 auftauchte, war die Funktionsfähigkeit der Zylinderdichtungen, welche ursprünglich von einer Firma aus Großbritannien geliefert wurden. Folglich spezialisierte sich Oyster 800 auf Zuverläs-

sigkeit und Wartungsfreundlichkeit. Die Konstruktion wurde vereinheitlicht und alle beweglichen Teile wurden in zwei Modulspeicher und zwei Zylindermodule zusammengefasst. Diese Module können von relativ kleinen Schiffen, die in jedem Hafen weltweit verfügbar sind, ausgetauscht werden. Die allgemeine Oyster-800-Konstruktion ist in **Bild 3** dargestellt.

Oyster 800 stellt eine enorme Veränderung in Konstruktion, Größe und Leistungsabgabe dar. Verglichen mit Oyster 1 ist der Oszillator etwa 50 % breiter (26 m) produziert worden, leistet aber aufgrund der hydrodynamischen Konstruktionsoptimierung rund 250 % mehr Energie. Oyster 800 wird Teil einer Anordnung von drei Wellenenergie-Wandlern, die mit nur einer einzigen hydroelektrischen Anlage an Land verbunden sind, was die Gesamtwirtschaftlichkeit enorm verbessert.

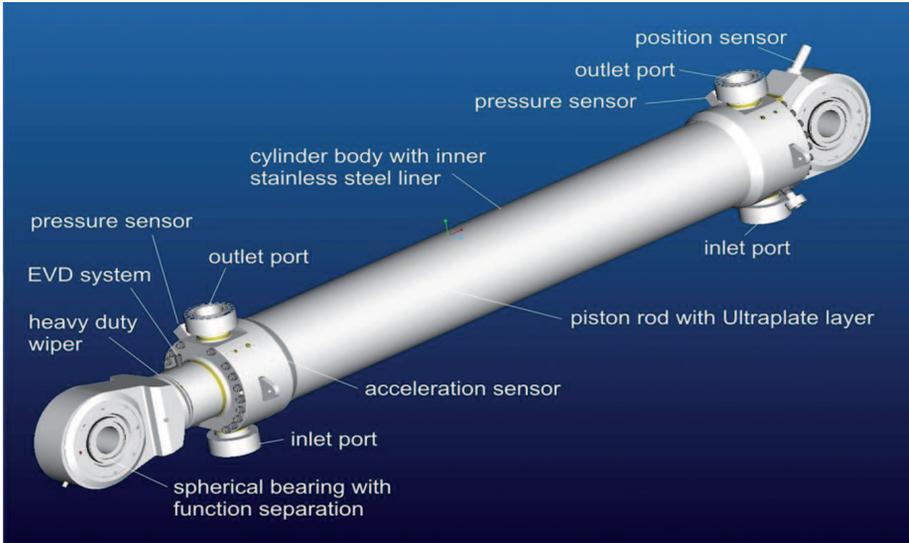
Die Zylindermodule und der gesamte Energiekonverter wurden stark instrumentiert, um das Verständnis für technische Herausforderungen zu vertiefen und um die Zuverlässigkeit für zukünftige Konstruktionen zu verbessern. **Bild 4** zeigt eines der Zylindermodule, eingebaut in einen Oyster 800.



3: Oyster 800



4: Das Zylindermodul in Oyster 800



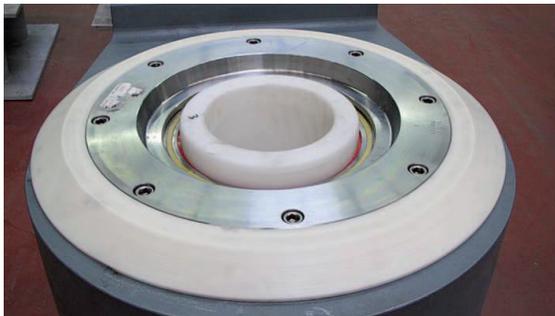
5: Hauptkomponenten des Oyster-800-Zylinders

Die Verschleißteile des Zylinders so konstruiert sein, dass sie diesen Servicezeitraum unbeschadet überstehen. Zusätzlich wurden ein servicefreundliches Design und die Möglichkeit Hauptkomponenten aufzuarbeiten gewünscht. Bild 5 zeigt die Hauptkomponenten eines Oyster-800-Zylinders.

Unter vollen Belastungsbedingungen beträgt der Arbeitsdruck 120 bar bei Spitzendrücken bis zu 160 bar. Das scheint nicht außergewöhnlich, aber in Anbetracht der Zyklenzahl führte die Lebensdauerberechnung zu einem vergleichbar starken Design.

Um der umweltfreundlichen Technologie eines Wellenkraftwerks zu entsprechen ist das Betriebsmedium für die Hydraulikzylinder und die Pelton-Turbine an Land als 95%-wasserbasiertes Hydraulikfluid vorgegeben. Zusätzlich muss das komplette System eine Teilverunreinigung des Fluids mit Meerwasser vertragen. Das setzt einen guten Korrosionsschutz aller inneren Zylinderteile voraus. Die Kolbenstange ist mit der im Offshore-Einsatz bewährten Ultraplate-Beschichtung versehen und die Zylinderlauffläche hat einen Edelstahl-Liner für Langzeit-Korrosions- und -Verschleißschutz erhalten. Auch die Dichtungs- und Führungselemente mussten auf die begrenzten Schmiereigenschaften eines wasserbasierten Hydraulikfluids wie auch der erwarteten Lebenszeit angepasst werden. Um verschiedene vielversprechende Dichtungsmaterialien und -designs zu erforschen, wurde eine maßstabgetreue Testvorrichtung hergestellt, die die Hauptfaktoren wie wasserbasiertes Fluid, Systemdruck und Geschwindigkeit, Wasserumgebung, sinusförmiges Fahrprofil und ausgewählte Oberflächenmaterialien simulieren kann. Für die Gelenklager an Kolbenstange und Boden gab es ebenfalls keine umfangreichen Erfahrungen. Demzufolge wurden neue Design- und Funktionsideen realisiert, um den Anforderungen zu entsprechen. Während ein normales Gelenklager eine Auflagefläche für alle Last- und Bewegungskonditionen hat, hat die Sonderausführung der Gelenklager für die Oyster-800-Zylinder getrennte Funktionsweisen in drei Lagerebenen (Bild 6). Ziel war die Verbesserung der Laststabilität und die Verteilung des Verschleißes auf mehr als eine Lageroberfläche.

Letztlich wurden verschiedene elektronische Sensoren installiert, um die Hauptkonditionen des Zylinders wie Systemdruck, Hub, Geschwindigkeit und mechanische Beschleunigung, die auf den Zylinderkörper einwirken, zu kontrollieren. Alle Sensoren sind so konstruiert, dass ein Wechsel unter Wasser von einem Taucher durchgeführt werden kann. Die Leistung aller Funktionen wurde während des Abnahmetests der Zylinder geprüft (Bild 7).



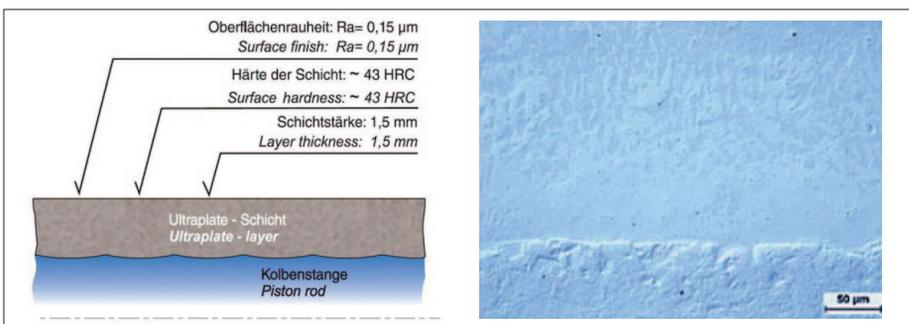
6: Oyster-800-Gelenklager

Allgemeine Zylinderkonstruktion

Die Hydraulikzylinder mussten so konzipiert sein, dass sie den Bedingungen in der Unterwasserumgebung genügen. Während der festgelegten Systemlebensdauer von 25 Jahren, werden die Zylinder rund 120 Millionen Zyklen mitmachen. Um aber die Systemleistung zu halten, ist ein Fünf-Jahres-Servicezeitraum für das endgültige Oyster System geplant, was 24 Millionen Zyklen entspricht. Demzufolge müssen die ty-



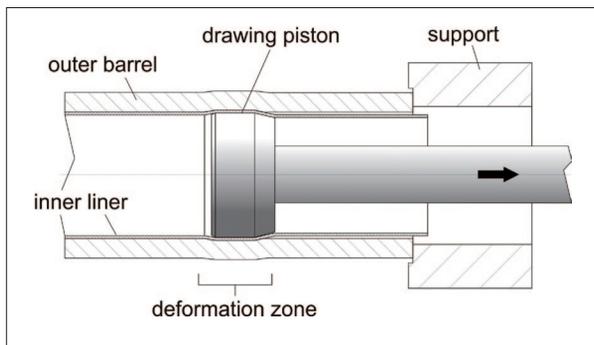
7: Oyster-800-Zylinder auf dem hydraulischen Teststand



8: Ultraplate-Schicht und Verbindungszone unter Vergrößerung [3]



9: Teststück mit Ultraplate-Schicht in der Nordsee



10: Aufbau des Edelstahl-Verbundrohres



Kolbenstangenbeschichtung

Die Ultraplate-Kolbenstangenbeschichtung ist ein Plasmaschweißverfahren (PTA) für Auftragschweißungen auf der Kolbenstange, welche hervorragende Korrosions- und Abnutzungseigenschaften unter Offshore-Bedingungen bietet. Ultraplate wurde für schwierige Offshore-Anwendungen wie z. B. die Spritzzone oder Unterwasserbedingungen [1] gemäß Korrosionskategorien nach EN ISO 12944.2 entwickelt. Die Fähigkeiten sind durch viele Anwendungen seit über zehn Jahren getestet und bewährt, wie auch durch das DNV-Testprogramm nach den „Guideline for qualification of wear and corrosion protective surface materials for piston rods and other components“ [2]. **Bild 8** zeigt Schichtzusammensetzung und Eigenschaften der Ultraplate Beschichtung.

Das Schichtmaterial wird den Plasmaschweißbrennern in Form eines Pulvers zugeführt und wird unter der niedrigst möglichen Verdünnung mit dem Schichtträger verschweißt, um die Korrosionseigenschaften des reinen Schichtmaterials zu erhalten. Das Ergebnis ist eine porenfreie Schicht, die stark an das Grundmaterial angebunden ist und damit grenzenlosen Meerwasserwiderstand und ausreichenden Abnutzungswiderstand bietet. Die Effizienz der Ultraplate-Beschichtung wurde unter Berücksichtigung der Schichtzusammensetzung, Härte und Korrosionswiderstand nach ASTM G48 „pitting corrosion test“ getestet

und beglaubigt von Det Norske Veritas (DNV). Diese Tests sind Teil der Richtlinien für die Qualifizierung von Kolbenstangenbeschichtungen für Offshore-Anwendungen. Um weitere Informationen über Ablagerungen, Abriebeffekte oder das biologische Wachstum auf der Ultraplate-Beschichtung in realer Meeresumgebung zu erhalten, wurde das Teststück wie auf **Bild 9** zu sehen im Meer neben der Oyster-1-Installation positioniert.

Verbundrohr mit innerem Edelstahl-Liner

Um die Bohrungsoberfläche des Zylinders gegen Korrosion zu schützen, wurde ein Edelstahl-Liner in Form eines dünnen Rohrs in dem aus Karbonstahl gefertigtem Zylinderrohr installiert. Der Edelstahl-Liner steigert nicht die Stabilität des Zylinders, bietet aber einen zuverlässigen Korrosionsschutz und einen guten Abnutzungswiderstand. Um eine starre Verbindung zwischen dem inneren Liner und dem äußeren Rohr zu bekommen wurden beide Elemente auf einer speziellen Rohrziehmaschine (**Bild 10**) verzogen.

Mithilfe eines Innen-Werkzeugs in Form eines Kolbens, welches durch die vorher angepassten Rohre gezogen wird, werden beide Rohre so erweitert, dass nach Lösen der Belastung die zwei Rohre lückenlos als ein Verbundrohr zusammenhalten. Nach dem Ziehvorgang werden die Enden beider Stücke, um sie zu versiegeln, gefräst und zu-

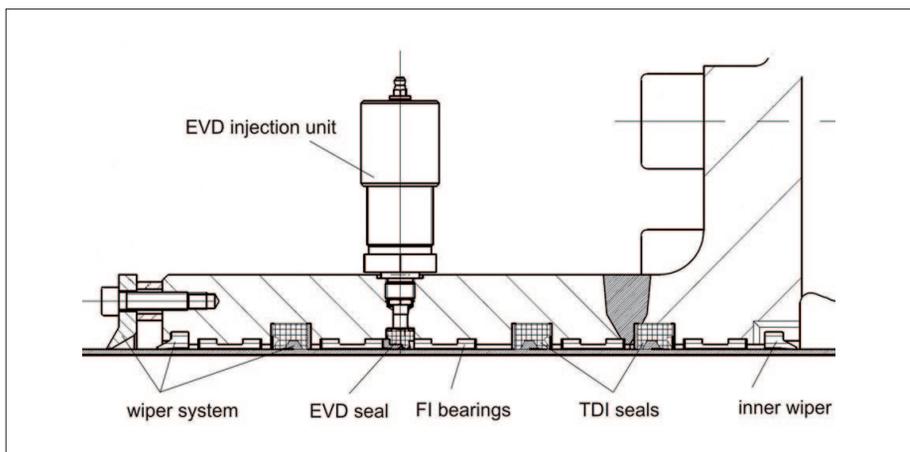
sammen geschweißt. Danach wird die Liner-Bohrungsoberfläche, wie bei einem Standardrohr auf die vorgegebene Oberflächenqualität geholt. Neben den sehr guten Korrosionseigenschaften ist ein weiterer Vorteil, dass das Verbundrohr im Fall von tiefen Schäden in der Liner-Oberfläche entfernt und gegen ein Neues ausgetauscht werden kann. Somit ist die Weiterverwendung des äußeren Zylinderrohrs gewährleistet.

Dichtungs- und Führungssystem

Für das Dichtungs- und Führungssystem der Oyster-Zylinder wurden Anforderungen wie z. B. lange Lebensdauer, gute Servicezugänglichkeit, Verschmutzungstoleranz, Möglichkeiten des biologischen Wachstums auf der Rohroberfläche, verminderte Schmiereigenschaften des Fluids und die chemische Verträglichkeit berücksichtigt. Um dies zu erreichen wurden modifizierte Dichtungs- und Führungselemente aus dem Hunger-DFE-Programm verwendet und verschiedene Elemente wurden verschiedenen Funktionen zugeordnet. **Bild 11** zeigt eine Stangendichtung und die Führungsanordnung eines vorherigen Oyster-Zylinders.

Von Innen angefangen ist das erste Element ein Abstreifer; dieser verhindert, dass mögliche Verunreinigungen des Fluids in das Dichtungs- und Führungssystem eindringen können. Um Druckdifferenzen über dem Abstreifer zu verhindern, wurden kleine Ausgleichsbohrlöcher vorgesehen. Die Kolbenstange wird geführt von modifizierten FI-Führungsrings. Aufgrund ihres speziellen stufenförmigen Profils bieten diese Elemente den Vorteil einer erhöhten Auflagefläche, die gegen Auslenkung in Bewegungsrichtung wirkt und für erhöhten Abstand zwischen Kolbenstange und Zylinderkopf-Stahlteil sorgt.

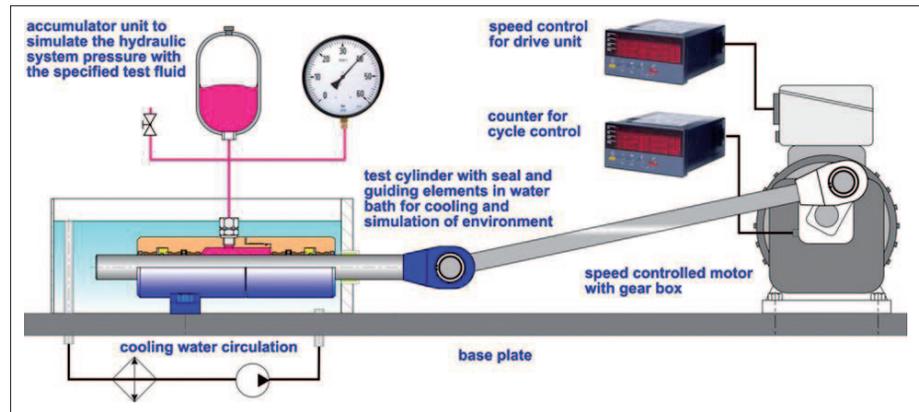
Selbst unter hohen Seitenlastbedingungen oder fortgeschrittener Abnutzung an den Führungselementen ist ein ausreichender Abstand, der Metall-auf-Metall-Kontakt verhindert, garantiert. Die Materialzusammensetzung der FI-Führungselemente wurde so gewählt, dass Notlaufbedingungen sogar ohne Fluid gewährleistet sind.



11: Stangendichtung und Führungsanordnung eines Oyster-Zylinders

Das Dichtungssystem besteht aus zwei Hunger-TDI-Dichtungsvarianten. Die erste Dichtung auf der Druckseite wurde als Hauptdichtung festgelegt, gefolgt von einem weiteren identischen TDI. Während die druckbeaufschlagte Hauptdichtung das erwartete Abnutzungsverhalten zeigen wird, läuft die zweite Dichtung ohne Druckbeaufschlagung mit geringerer Abnutzung so lange, wie die Hauptdichtung in voller Funktion ist. Wenn die Hauptdichtung abgenutzt ist, wird die zweite Dichtung immer noch eine verbleibende Abnutzungskapazität haben, um den Zylinder abzudichten. Hintergrund dieser Konzeption ist es nicht, ein 100 % abgedichtetes System zu haben, sondern eher die Lebenszeit zu erhöhen. Um die richtige Dichtungsform und das richtige Dichtungsmaterial zu finden, wurde ein Langzeittestlauf durchgeführt.

Den beiden TDI-Dichtungen folgt ein extern nachstellbares Dichtsystem EVD. Diese Art von vorinstallierter Ersatzdichtung besteht aus einem Dichtungselement, welches ohne Vorspannung zur Kolbenstange und zur Aktivierungseinheit angebracht wird. Dieses System bietet die Möglichkeit, den Zylinder im Fall von abgenutzten TDI-Dichtungen erneut abzudichten. Um das System zu aktivieren muss ein Taucher die Kappe der Einspritzeinrichtung, die auf dem Zylinderkopf befestigt ist, drehen, damit das EVD-System mit einem Spezialgel unter



12: Teststand für Dichtungsauswertungen

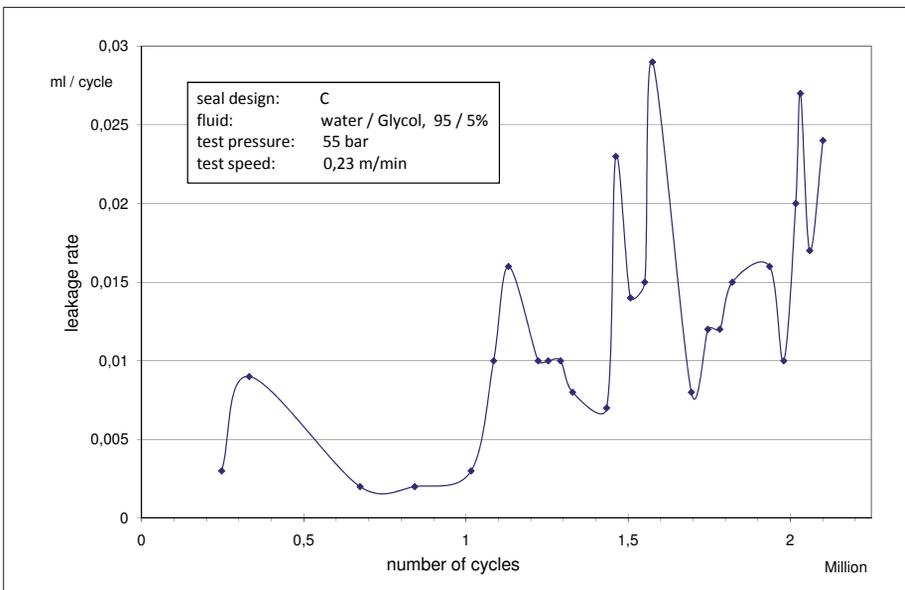
Druck gesetzt werden kann. Die Dichtungslippe der EVD-Dichtung wird gegen die Kolbenstangenoberfläche gedrückt und der Zylinder ist wieder abgedichtet.

Die nächsten drei Elemente, eine nach außen gerichtete TDI-Dichtung, ein Al-Abstreifelement und ein äußerer Edelstahl-Abstreifer, teilen sich die Aufgabe das Meerwasser draußen zu halten, kleinere Verunreinigungen von dem Kolben abzustreifen und festsitzende Kontamination zu lösen.

Dichtungsprüfstand

Um die ausgewählten Dichtungselemente vor dem Start des Oyster-Systems zu testen,

wurde ein maßstabsgerechter Teststand entworfen und hergestellt, der Hauptabläufe und Umweltbedingungen der Dichtungen simuliert. Wie in **Bild 12** zu sehen besteht der Teststand aus einer drehzahlgeregelten Antriebseinheit mit Getriebe und Hebelarm, der eine Kolbenstange sinusförmig antreibt. Das simuliert die pendelnde Kolbenbewegung der Oyster-Klappe. Der Testkolben ist geführt und abgedichtet in einem Zylinderrohr, das mit 95 % auf Wasser basierendem Fluid durch eine Speichereinheit druckbeaufschlagt wird. Der ganze Zylinderkörper ist, zu Kühlzwecken und um die Umwelt der Dichtungselemente zu simulieren, in ein Wasserbassin eingetaucht.



15: Leckagerate des verbesserten Dichtungsdesigns

Mit dem Teststand können hydraulische Dichtungen unter Drücken bis zu $p = 70$ bar und mit einer einstellbaren Laufrate von $0,5 \text{ Hz} < f_r < 0,7 \text{ Hz}$ getestet werden.

Mit diesem Teststand wurden verschiedene Dichtungsmaterialien und -designs über bislang insgesamt fünf Millionen Zyklen getestet. Die Testergebnisse flossen direkt in die Oyster-1-, Oyster-800- und Oyster-801-Designs ein.

Testergebnisse

Um mit den Tests zu starten, wurden vielversprechende Dichtungsdesigns und Materialien aus dem Hunger-DFE-Programm (Dichtungsdesign A) ausgewählt. Diese Dichtungen wurden mit 95/5 % Wasser-/

Glykol-Fluid unter $p = 50$ bar mit Druck beaufschlagt und die Testgeschwindigkeit wurde mit $v = 0,16 \text{ m/min}$ eingestellt, was der durchschnittlichen realen Zylindergeschwindigkeit entspricht. Bereits nach 30000 Zyklen musste der erste Testlauf aufgrund zu hoher Leckage unterbrochen werden. Die Untersuchung der Dichtungen hat einen völlig abgenutzten Dichtungskörper gezeigt, mit zusätzlichen mechanischen Schäden aufgrund von hoher Reibung und einigen Kavitationsschäden (Bild 13).

Nach besseren Ergebnissen aufgrund verbessertem Dichtungsdesign mit angepasster Profilform und neuem Material wurde versucht, die Testgeschwindigkeit von $v = 0,23 \text{ m/min}$ auf $0,45 \text{ m/min}$ zu erhöhen, was ungefähr drei Mal schneller ist als in der Realität. Die Dichtungszusammen-

setzung fiel bereits nach kurzer Zeit aus und die Untersuchung zeigte, dass die Dichtungselemente durch Kavitation und Blow-by-Effekte zerstört wurden.

Nach diesen anfänglichen Enttäuschungen wurde ein neues Dichtungsdesign C entwickelt, welches sich bei Millionen von Zyklen, mit akzeptabler Abnutzung und Verschleiß bewährt hat. Bild 14 zeigt den Zustand einer solchen getesteten Dichtung. In aktuellen Tests wird deren Beständigkeit weiter getestet und mit den Praxis-Resultaten von Oyster-800 im Meer verglichen.

Während jedem Testlauf wurde auch die Leckagerate als vorab Indikator für Abnutzung und Verschleiß der Dichtungen gemessen. Die Kurve in Bild 15 zeigt, wie sich die Dichtungsleckage über den Testlauf entwickelt hat. Die allgemeine Tendenz zu einer fortlaufend steigenden Leckage entspricht der progressiven Abnutzung der Dichtungslippe. Aber die im Test erreichte Leckagerate ist für die reelle Anwendung von niedriger Bedeutung und kein Ausfallkriterium, da es nur weniger als zehn Millionstel von dem bei jedem Lauf gepumpten Fluid darstellt.

Ausblick

Parallel zur Testdauer des Oyster-800-Systems wird das Engineering von Oyster 801 vorangetrieben. Das beinhaltet auch ein neues Zylinderdesign, welches auf den vorherigen Zylindern basiert, aber in größerem Maßstab und mit einigen Detailverbesserungen. Auch der Dichtungsprüfstand läuft kontinuierlich, um so viele Daten wie möglich zu gewinnen, welche in das reale System einfließen werden. Von dem Oyster-801-System werden zwei Einheiten installiert, um erstmalig eine parallele Zuführung von hydraulischer Energie in die Generator-einheit zu ermöglichen. Weitere Systeme mit Bedarf an Spezial-Hydraulikzylindern sind über die kommenden Jahre in Planung. Zukünftige Entwicklungen werden eine gesteigerte Zuverlässigkeit, längere Serviceintervalle, weiter steigende Größe und den Betrieb mit klarem Wasser beinhalten, mit möglichem Ausblick auf Meerwasser in einem offenen Kreislauf.

Hunger

www.vfmz.net/141090

Literaturhinweise

- [1] Kolbenstangenbeschichtungen für maritimen Einsatz, Dr.-Ing. MBA Ingo Rühliche, Tagungsband Oberflächentagung, Bremen 2009, Germany [2] Guideline for qualification of wear and corrosion protective surface materials for piston rods and other components, Report no. 2009-3295, Rev. 0, Det Norske Veritas (DNV) Veritasveien, Norway [3] Ultralplate Reference List 2011, Walter Hunger GmbH & Co. KG - Hydraulikzylinderwerk, Lohr am Main, Germany, www.hunger-hydraulik.de