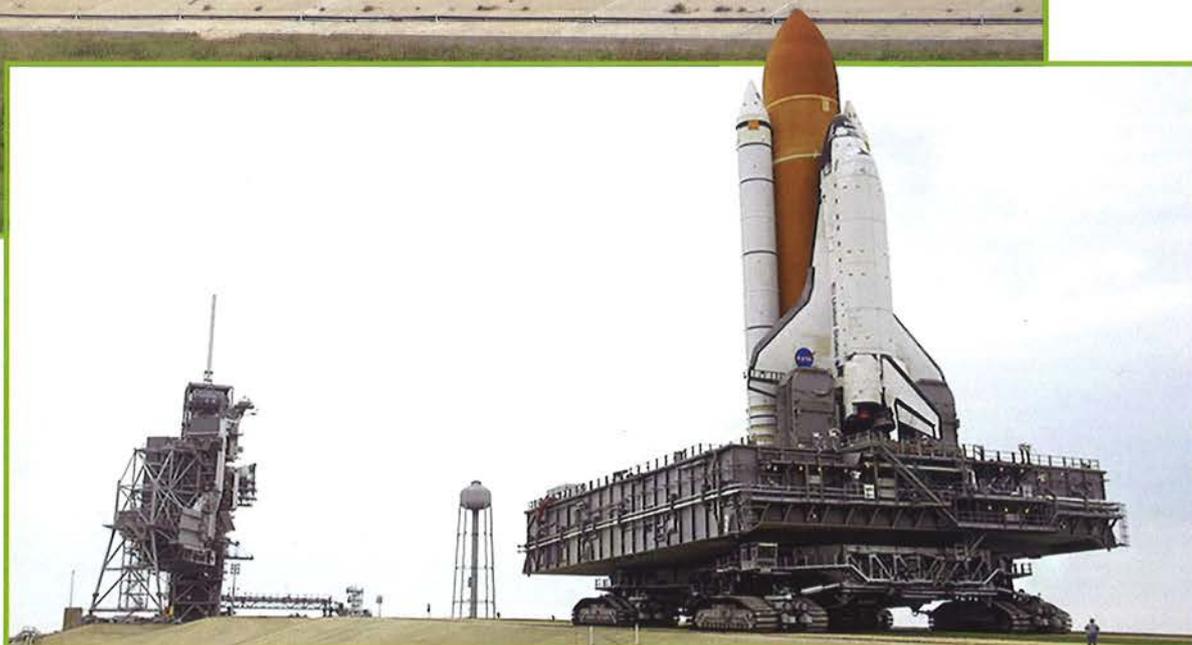


HUB- UND NIVELLIERZYLINDER FÜR NASA-RAKETENTRANSPORTER

Ingo Rühlicke

Für den Transport ihrer Raumschiffe von der Montagehalle zu den Startrampen am Kennedy Space Centre in Florida setzt die NASA zwei spezielle Transporter ein. Die aktuell in der Entwicklung befindlichen Orion-Raumschiffe machten eine Nutzlasterhöhung der Transporter um plus 50% erforderlich. Um dies zu gewährleisten, hat die Firma Hunger Hydraulik neue Hub-, Ausgleich- und Nivellierzylinder (Jacking, Equalizing and Levelling Cylinder – JEL Cylinder) entwickelt und gebaut. Diese ermöglichen die erhöhte Ladekapazität, weisen aber auch eine Reihe von Verbesserungen in Bezug auf Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit auf. Nach der technischen Genehmigung und Abnahme wurden die JEL-Zylinder in einem eigens entwickelten dynamischen Lastprüfstand bis an die Leistungsgrenze getestet und anschließend weitere Tests in den NASA-Transportern selbst durchgeführt.



Die beiden NASA-Transporter am Kennedy Space Centre wurden in den Jahren 1963 bis 1965 gebaut und ermöglichen den Transport einer Startplattform mit aufgebauter Saturn-V-Rakete und montiertem Apollo-Raumschiff von der Montagehalle zu einer der Startrampen. Später wurden die Transporter für die Spacelab, die Apollo-Sojus und für alle Space-Shuttle-Missionen genutzt. Für diese Aufgabe wurden die Transporter mit acht Raupenkettensystemen, von denen je zwei in einem Fahrwerk angeordnet sind ausgestattet. Die technischen Daten sind mit einer Länge von 40 m, einer Breite von 35 m und mit einer ursprünglichen maximalen Lastkapazität von 6000 t beeindruckend. Das Hub- und Nivelliersystem (JEL) besteht aus 16 einfachwirkenden Hydraulikzylindern, von denen je 4 in einem Fahrwerk angeordnet sind. Mit diesem Hub- und Nivelliersystem kann eine komplette Startplattform mit aufgebautem Raumschiff von ihrer Position in der Montagehalle angehoben, während der Fahrt ausnivelliert und schließlich auf der Startrampe abgesetzt werden. Um all diese Funktionen zu realisieren haben die JEL-Zylinder einen maximalen Hub von 2 m, der auch ausreicht, um den Steigungswinkel von 5° bei der Auffahrt auf die Startrampe auszugleichen. Für die erforderliche Freigängigkeit beim Lenken und Nivellieren waren die originalen JEL-Zylinder mit sphärischen Lagern an Stangenende und Zylinderboden ausgestattet. Die Lasthaltung und Positionskontrolle wurde durch je ein Steuerventil pro JEL-Zylinder realisiert, wobei es bereits möglich war, im Störfall einen einzelnen Zylinder abzuschalten und die Last mit den verbliebenen Zylindern abzustützen. **Bild 01** zeigt die Einbausituation der originalen JEL-Zylinder in einem Fahrwerk. Die Hydraulikanlage für alle Fahrwerke ist zentral im Transporter angeordnet.

Jetzt, nach 50 Jahren im Einsatz, wurden beide Transporter komplett überholt und bei dieser Gelegenheit wurde die Lastkapazität einer der beiden Transporter um plus 50% erhöht. Dazu mussten neben Anpassungen an der tragenden Struktur auch die JEL-Zylinder erneuert werden. Diese Modifikationen werden es der NASA ermöglichen, die Transporter weiterhin für bemannte Raumflüge in den nächsten 20 Jahren einzusetzen [1].

AUFGABENSTELLUNG

Die Spezifikation für die neuen JEL-Zylinder wurde von der NASA ausgearbeitet, aber es wurden auch einige Vorschläge von Hunger Hydraulik bezüglich des Design-Konzeptes berücksichtigt. Neben der Lasterhöhung lag das Augenmerk vor allem auf einer Verbesserung der Zuverlässigkeit und der Sicherheit des JEL-Systems. Die Hauptanforderungen umfassten demnach:

- Lasterhöhung des JEL-Systems um plus 50% unter Berücksichtigung der vorhandenen hydraulischen Versorgung mit gegebenen hydraulischen Drücken und Volumenströmen,
- Verwendung der gleichen Einbauträume und der gleichen Montagepunkte für die neuen JEL-Zylinder,
- Verbesserung der sphärischen Lagerung,
- mehrstufiges Sicherheitskonzept für die hydraulische Lastabsicherung,
- einfachere Installation und Handling der JEL-Zylinder,
- verbesserter Korrosionsschutz für die Kolbenstangen in der Marineatmosphäre am Kennedy Space Centre,
- Entwicklung und Bau eines dynamischen Prüfstandes für die JEL-Zylinder, welcher eine Prüfung unter Volllast ermöglicht.

Basierend auf diesen Anforderungen wurde eine Risikoanalyse sowohl für die existierenden als auch für die neu zu bauenden JEL-Zylinder durchgeführt und die Auswirkung verschiedener Störungen, wie beispielsweise Ausfall der Hauptdichtung, Bersten der Druckleitung oder Versagen eines sphärischen Lagers analysiert. Dabei konnte herausgestellt werden, dass das neue JEL-Zylinderdesign das Systemverhalten deutlich verbessert und damit sichergestellt werden kann, dass die Transportaufgabe ohne erhöhtes Risiko abgeschlossen werden kann.



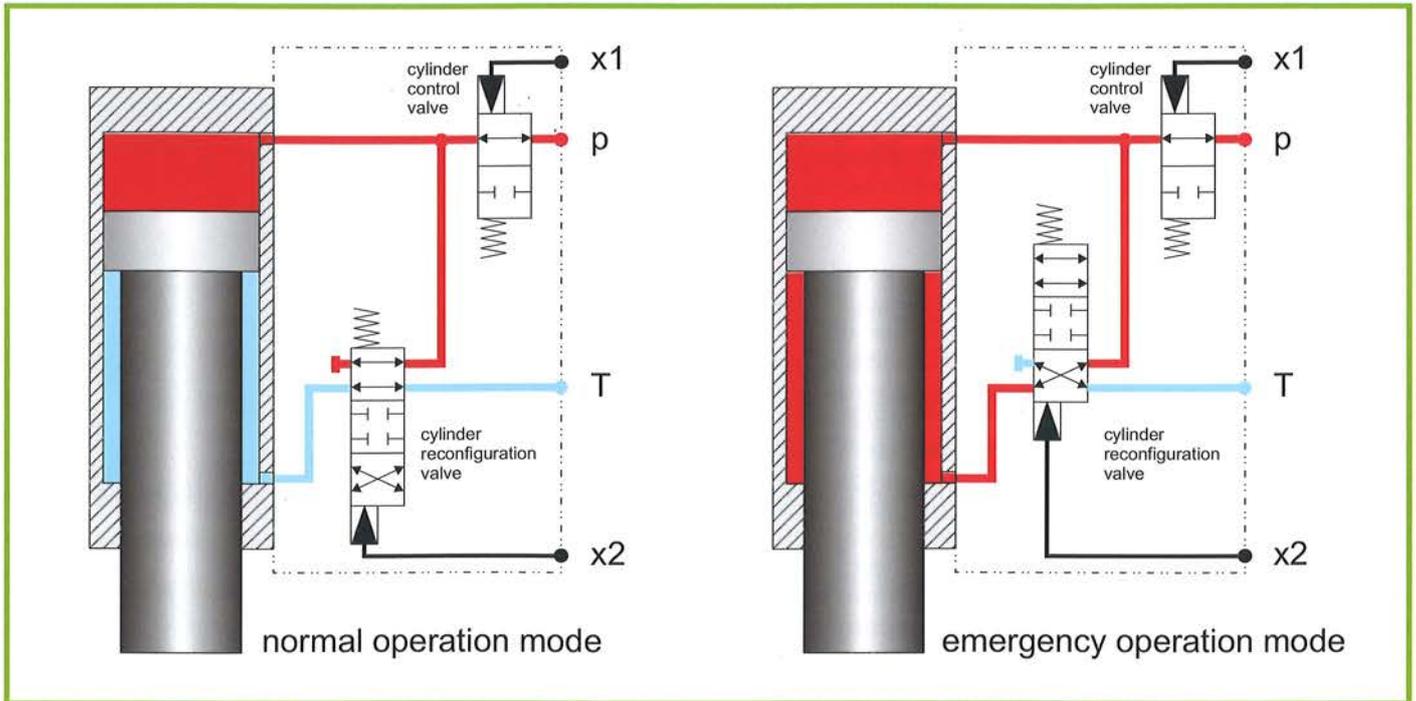
01 Einbausituation der alten JEL-Zylinder in einem Fahrwerk

DESIGNLÖSUNG FÜR DIE NEUEN JEL-ZYLINDER

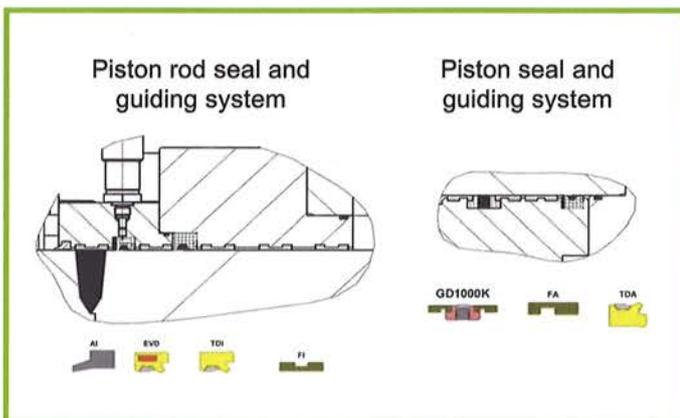
Es wurde ein Zylinderdesign entworfen und der NASA vorgestellt, welches sämtliche oben genannten Anforderungen erfüllen kann. Nach umfassender Überprüfung und einer vorläufigen Freigabe wurden zwei Prototyp-Zylinder gebaut, um deren Herstellbarkeit, Leistungsfähigkeit und Qualität zu beurteilen. Später erst, nachdem alle erforderlichen Tests erfolgreich absolviert worden sind, wurden die Einsatzzylinder für den erste Transporter gefertigt.

Die neuen JEL-Zylinder wurden nach ASME-Standard konstruiert und berechnet und mit geflanschem Kopf und Boden für eine einfache Wartung ausgeführt. Um die 50%ige Lasterhöhung bei gleichem Systemdruck zu realisieren, musste der Zylinderdurchmesser erhöht werden, wobei gleichzeitig der vorhandene Einbautraum in dem Transporter berücksichtigt werden musste. Anstelle der ursprünglichen sphärischen Lager mit Bolzen und Gabelbefestigung wurden jetzt wartungsfreie Kugelgelenklager vorgesehen. Zusätzlich wurden diese für ein einfaches Handling mit Adapterplatten mit Schnellmontagekupplungen ausgestattet. Die ursprünglich in die Rohrleitung integrierten Sicherheitsventile wurden durch auf die JEL-Zylinder geflanschte hydraulische Sicherheitsblöcke ersetzt.

Obwohl auch die neuen JEL-Zylinder die Last lediglich gegen die Gravitation heben und senken müssen, wurde dennoch ein doppelt wirkendes Zylinderdesign gewählt, da dies einige Vorteile gegenüber den ursprünglich einfach wirkenden Zylindern bietet. Einerseits ist jetzt die druckbelastete Dichtung die Kolbendichtung, welche beidseits von der gefilterten Hydraulikflüssigkeit umgeben und damit besser vor äußeren Einflüssen geschützt ist. Andererseits kann die ja trotzdem vorhandene Kolbenstangendichtung als sekundäre Notdichtung verwendet werden, wenn der betreffende JEL-Zylinder im einfach wirkenden Notbetrieb, der durch eine spezielle Schaltung im Sicherheitsblock realisiert wird, betrieben wird. Um diesen Notbetrieb zu aktivieren muss bei einer Störung lediglich das entsprechende Ventil (cylinder reconfiguration valve) aktiviert werden. Damit der Druck und die Abstützkräfte des im Notbetrieb befindlichen Zylinders so wenig wie möglich von den anderen Zylindern im Normalbetrieb abweichen, wurde bei der Zylinderkonstruktion der Kolbenstangendurchmesser so groß wie nur möglich gewählt. Im **Bild 02** ist die hydraulische Schaltung der JEL-Zylinder im Normal- und im Notbetrieb dargestellt.



02 Hydraulische Schaltung der Zylinder im Normal- und im Notbetrieb



03 Dichtelemente im Zylinderkopf sowie am Kolben der Zylinder

DICHTUNGSDESIGN

Für eine Lasthaltung unter allen Umständen sowie für ein stick-slip-freies Fahrverhalten ist die Wahl der richtigen Dicht- und Führungselemente von enormer Bedeutung. Die dynamischen Dichtelemente am Kolben sowie im Zylinderkopf wurden aus dem Hunger-DFE-Standardprogramm ausgewählt und wie im Bild 03 dargestellt angeordnet [2]. Da die JEL-Zylinder nur in Druckrichtung belastet werden, wurde als Hauptdichtung ein TDA-Dichtelement mit Orientierung zum Kolbenraum eingesetzt. Ein sekundäres GD1000K-Dichtelement bietet zusätzliche Sicherheit und dichtet zudem den Kolben gegen Betriebsdruck aus dem Stangenraum ab, der während der Zylinderinstallation zur Positionseinstellung beaufschlagt werden kann. Die Dichtungsanordnung im Zylinderkopf besteht aus einem TDI-Dichtring als Hauptdichtung und einem von außen nachstellbaren EVD-Dichtring als Sekundärdichtung. Zusammen mit der bereits zuvor beschriebenen Sicherheitsschaltung können folgende Betriebszustände realisiert werden, um die JEL-Zylinder sicher abzudichten:

- Normalbetrieb: Die TDA Kolbendichtung (zusammen mit dem nachgeschalteten GD1000K) dichtet den Lastdruck im Kolbenraum ab. Der Stangenraum ist über die Tankleitung drucklos geschaltet.

- Notbetrieb 1: Die TDI Stangendichtung dichtet den Lastdruck im Fall eines Versagens der Kolbendichtungen ab. Kolben- und Stangenraum sind hydraulisch verbunden.

- Notbetrieb 2: Die EVD Stangendichtung dichtet den Lastdruck im Fall eines Versagens der Kolbendichtungen und der TDI Stangendichtung ab. Kolben- und Stangenraum sind hydraulisch verbunden.

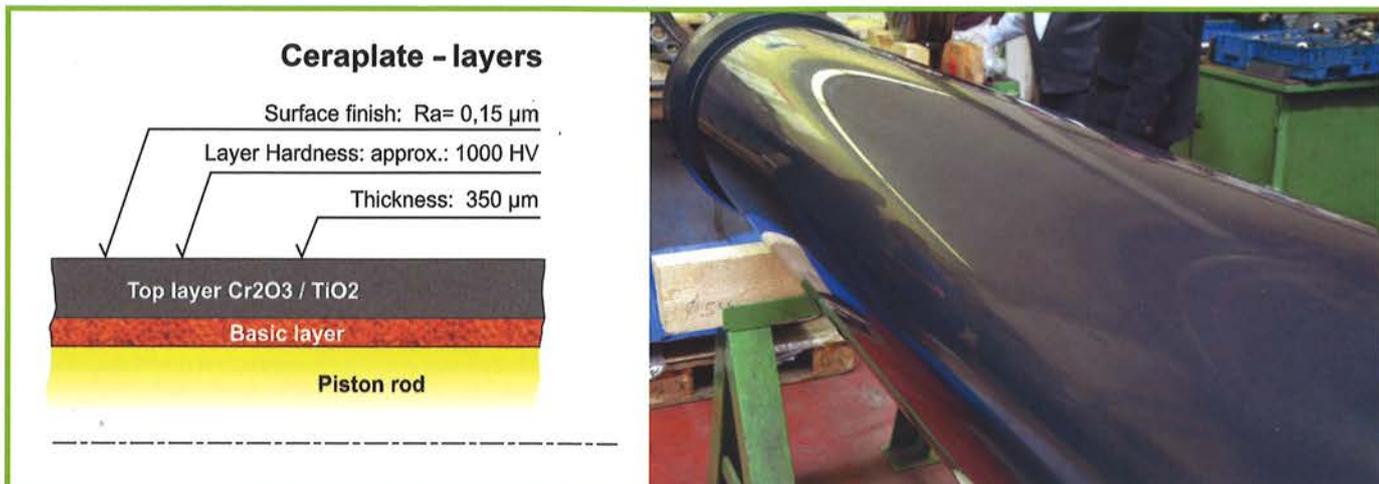
Zur Führung des Kolbens und der Kolbenstange sowie zur Aufnahme sämtlicher Seitenkräfte wurden FI/FA-Führungselemente verwendet. Diese bestehen aus einem POM-PTFE-Bronze-Kunststoff-Compound und garantieren geringe Reibung und eine stick-slip-freie Hubbewegung, auch bei sehr geringen Geschwindigkeiten. Das spezielle Profil der Führungselemente garantiert einerseits einen Abstand von 3 mm zwischen den sich relativ zueinander bewegenden Bauteilen und kann andererseits die Dichtelemente in Bewegungsrichtung spaltfrei abstützen und damit jegliche Extrusion des druckbelasteten Dichtungskörpers zuverlässig verhindern.

KOLBENSTANGENBESCHICHTUNG

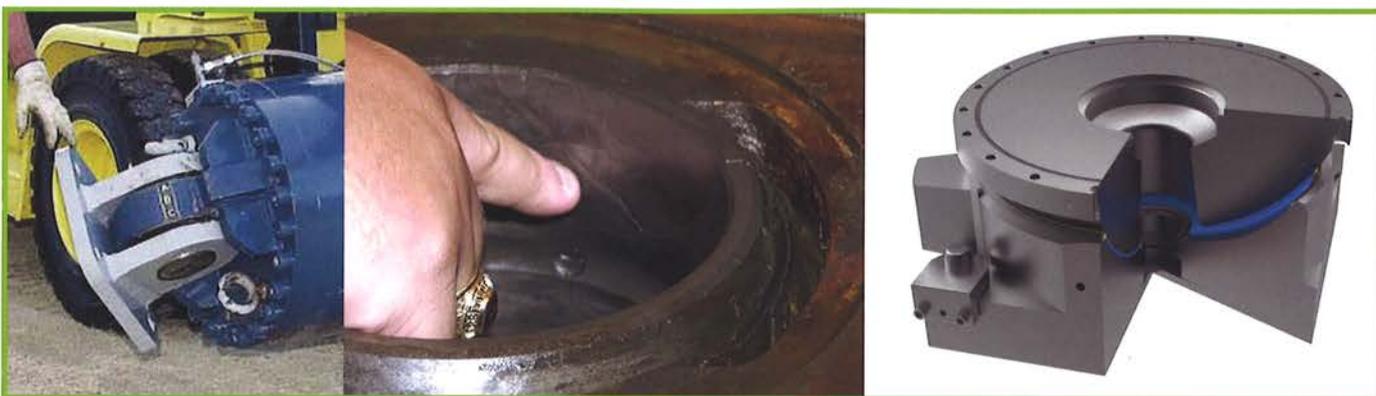
Um die Kolbenstangen der JEL-Zylinder in der Marineatmosphäre des Kennedy Space Center vor Korrosion zu schützen wurden diese mit der thermisch gespritzten Metall-Oxid-Beschichtung Ceraplate beschichtet [3]. Diese Beschichtung garantiert auch dann ein hohes Maß an Korrosionsschutz, wenn die ausgefahrenen Kolbenstangen bei Nichtbenutzung des Transporters für eine längere Zeit der aggressiven Marineatmosphäre ausgesetzt sind. In Bild 04 sind die Schichtzusammensetzung sowie wichtige Eigenschaften der Ceraplate-Beschichtung aufgeführt. Die Leistungsfähigkeit der Ceraplate-Beschichtung hinsichtlich Zusammensetzung, Härte sowie Korrosionsbeständigkeit nach DIN EN ISO 9227 wird regelmäßig durch unabhängige Institute geprüft und bestätigt.

KUGELGELENKLAGER

Um die Lebensdauer und Zuverlässigkeit der JEL-Zylinderlager zu verbessern, wurde deren Design von einfachen Stahl- Stahl Gelenklagern mit Gabel und Bolzen zu sphärischen Kugelgelenklagern in



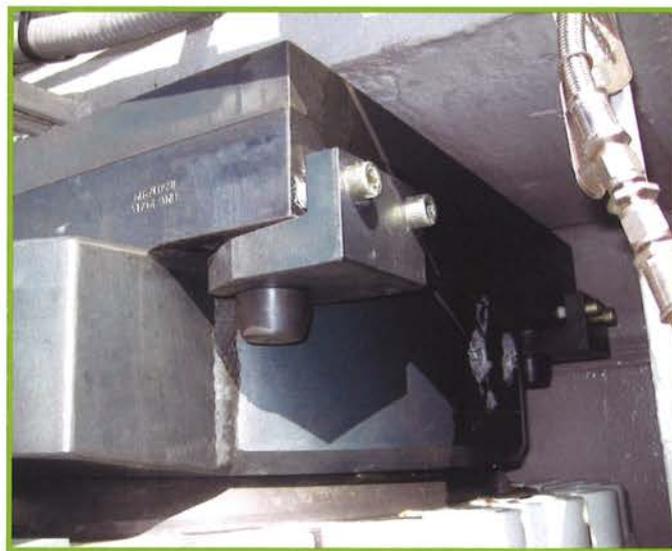
04 Ceraplate-Kolbenstangenbeschichtung – Schichtaufbau und JEL-Kolbenstange



05 Altes Lager mit gebrochenem Lagerring und neues Lagerdesign mit wartungsfreiem H- Glide Belag (ohne zentralen Haltebolzen)



06 JEL-Zylinder, aufgehängt im Lastrahmen



07 Obere Befestigung mit Adapterplatte und Spannkeilen

wartungsfreier Ausführung geändert. Da die alten Lager des Öfteren gebrochen waren, sollte das neue Lagerdesign deutlich robuster ausfallen und auch eine Überlastung ohne Probleme überstehen. Die neuen Kugelgelenklager bieten eine vergrößerte Kontaktfläche, welche die Spannungen im Lager selbst sowie an den Montagestellen reduziert und sie sind frei von Biegespannungen an allen belasteten Bauteilen. Als Lagerwerkstoff wurde der wartungsfreie Hunger-H-Glide-Belag verwendet, auf dem sich das gehärtete Ku-

gelsegment des Lagers abstützt. Das Kugelgelenklager erlaubt einen Kippwinkel von 7° in jede Richtung bei einer maximalen Druckbelastung des Lagerwerkstoffes von bis zu 160 MPa. Die Lagerhälften werden dabei von einem zentralen Haltebolzen mit sphärischer Mutter zusammengehalten. Um eine unkontrollierte Verdrehung des JEL-Zylinders zu unterbinden, ist das bodenseitige Kugelgelenklager mit einer Verdrehsicherung ausgestattet. Im **Bild 05** sind das alte und das neue Lagerdesign gegenübergestellt.



08 JEL-Zylinder im Lasthalterahmen auf dem Hydraulikprüfstand

HANDLING UND INSTALLATION

Auf Grund ihrer Größe wird fast jeder Service an den NASA-Transportern im Freien und unter Verwendung von Mobilkränen für schwere Bauteile durchgeführt. Im Fall der JEL-Zylinder erfordert der Einbauräum des Transporters, dass diese unter den oberen Lastrahmen eingebaut werden, was schwierig ist, wenn der Zylinder an einem Kranhaken hängt. Aus diesem Grund wurde ein Lastrahmen entwickelt und gebaut, der eine einfache Handhabung und Installation der JEL-Zylinder in den Transporter erlaubt (Bild 06).

Des Weiteren wurden die Befestigungspunkte am Transporter und an den JEL-Zylindern mit Adapterplatten und Schnellkupplungen versehen, die einen einfachen Austausch ermöglichen. Zunächst werden lediglich die oberen und unteren Adapterplatten an dem Transporter verschraubt, wobei hier noch eine sehr gute Zugänglichkeit gewährleistet ist. Für den Einbau oder Austausch der JEL-Zylinder müssen diese lediglich in Position gebracht und mit Spannkeilen gesichert werden (Bild 07).

ZYLINDERTESTS

Um die Leistungsfähigkeit der neuen JEL-Zylinder nachzuweisen wurde ein umfassendes Testprogramm entwickelt und absolviert. Dieses bestand neben den üblichen Qualitätskontrollen u.a. aus



09 Dynamischer Prüfstand mit Zylinder und Überprüfung der Komponenten nach dem Testlauf

statischen Tests, dynamischen Tests unter Maximallast sowie realen Hebe-, Nivellier- und Fahrtests mit dem Transporter.

Die statischen Tests wurden auf dem regulären Prüfstand der Walter Hunger GmbH & Co. KG durchgeführt, der um einen Lasthalterahmen für Belastungstests in der mittleren Hubposition bei Maximaldruck erweitert wurde (Bild 08). Des Weiteren wurden an den JEL-Zylindern alle Funktionen des Sicherheitsblockes überprüft sowie Freigängigkeit der Kippbewegung in den Kugelgelenklagern.

Um dynamische Tests an den JEL-Zylindern unter Volllast durchführen zu können, wurde ein dynamischer Prüfstand entwickelt und gebaut, der aus einem vertikalen Lastrahmen mit verfahrbarem Mittelsupport und oben liegendem Belastungszyylinder besteht. Hinzu kommt ein Hydraulikaggregat mit zwei unabhängig voneinander regelbaren Achsen sowie der erforderlichen Regel-, Mess- und Aufzeichnungstechnik. Der zu prüfende JEL-Zylinder wird in den unteren Bereich des Prüfstandes eingesetzt, wobei die Zugänglichkeit und die Montagebedingungen denen im realen Transporter nachempfunden wurden (Bild 09).

Das dynamische Testprogramm enthielt Abläufe mit Zyklen über den gesamten Hub, kürzere, oszillierende Hübe sowie verschiedene Belastungszustände. Ebenso wurden die verschiedenen Notbetriebsarten getestet. Während sämtlicher Versuche wurden die Systemparameter sowie die JEL-Zylinderparameter wie Drücke, Hubverläufe, Reibung, Anzahl der Zyklen usw. aufgezeichnet und abschließend ausgewertet. Am Ende des Testprogramms wurde jeder der getesteten JEL-Zylinder zerlegt und die einzelnen Komponenten hinsichtlich Verschleiß oder Beschädigungen untersucht (Bild 09). Basierend auf den ersten Ergebnissen an den Prototypzylindern konnten kleinere Designanpassungen für die JEL-Serienzylinder vorgenommen werden und es war eine Abschätzung bezüglich Lebensdauer und empfohlenem Serviceintervall für jede Komponente möglich.

FAHRVERSUCHE MIT DEN NEUEN JEL-ZYLINDERN

Um sicherzustellen, dass die neuen JEL-Zylinder in die vorhandenen Transporter-Einbauräume passen und um deren Funktion und Leistungsfähigkeit zu überprüfen, wurden vor Beginn der Serienfertigung die beiden Prototypzylinder in eines der Raupenfahrwerke an Stelle der alten Zylinder eingebaut. Dabei wurden sowohl das Handling beim Einbau als auch alle Interfaces sowie die Freigängigkeit der neuen Zylinder überprüft. Nach ersten Hubtests im Stand wurde der Transporter dann vom Montagegebäude die gesamte Strecke bis hinauf auf eine der Startrampen und wieder zurück gefahren. Dabei wurde die Betriebszustände Kurvenfahrt, das Heben und Nivellieren der Nutzlast sowie die Rampenfahrt erfolgreich absolviert (Bild 10). Die Testergebnisse wurde danach analysiert und notwendige, kleinere Anpassungen für die Serien-JEL-Zylinder übernommen.

Nach der Fertigung und den Prüfstandtests mit den Serien-JEL-Zylindern wurde der erste Transporter vollständig damit ausgerüstet und einer erneuten Erprobung unterzogen. Die abschlie-



10 Kurvenfahrt mit den Prototype JEL- Zylindern im Kennedy Space Center



11 NASA- Transporter mit neuen JEL- Zylindern

ßenden Fahr- und Lasttests konnten ebenso erfolgreich absolviert werden, so dass der erste Transporter für die kommenden NASA-Missionen einsatzbereit ist (Bild 11).

Fotos: Aufmacherbild unten, Bild 05 links und mitte sowie 06 NASA, Rest Hunger

www.hunger-hydraulik.de

Autor: Dr.- Ing. MBA Ingo Rühlicke ist Leiter der Projekt- und der Exportabteilung der Walter Hunger GmbH & Co. KG in Lohr am Main

Literatur:

- [1] NASA's Giant Crawlers turn 50 Years Old, Pivot Toward Future Exploration <http://www.nasa.gov/content/nasas-giant-crawlers-turn-50-years>, 23.02.2015
- [2] Hunger DFE Produktkatalog, Hunger DFE GmbH, Würzburg, 2015
- [3] Piston Rod Coatings, Walter Hunger GmbH & Co. KG, Lohr am Main, 2010

HUNGER
Hydraulics USA

A MEMBER OF THE HUNGER-GROUP

63 Dixie Highway · Rossford (Toledo), OH 43460
Phone: +1-419-66-4510 · Fax +1-419-66-9834
Internet: www.hunger-hydraulics.com
E-mail: info@hunger-hydraulics.com

HUNGER
Hydraulik

EIN UNTERNEHMEN DER HUNGER-GRUPPE

Rodenbacher Str. 50 · 97816 Lohr am Main, DE
Tel. +49 9352/501-0 · Fax +49 9352/501-106
Internet: www.hunger-hydraulik.de
E-mail: info@hunger-hydraulik.de