# WIND-KRAFT Journal & NATÜRLICHE ENERGIEN

Ausgabe 4/2014
34. Jahrgang
Preis : 5 Euro

## HAMBURG WASSER :
## Nordex N117/3000
## auf dem Klärwerksgelände
## Köhlbrandhöft

04
4 198198 605001

# Optimierter Einsatz von elastischen Lagerungen im Triebstrang von Windkraftanlagen

**Dipl. Ing. Franz Mitsch, ESM Energie- und Schwingungstechnik GmbH**

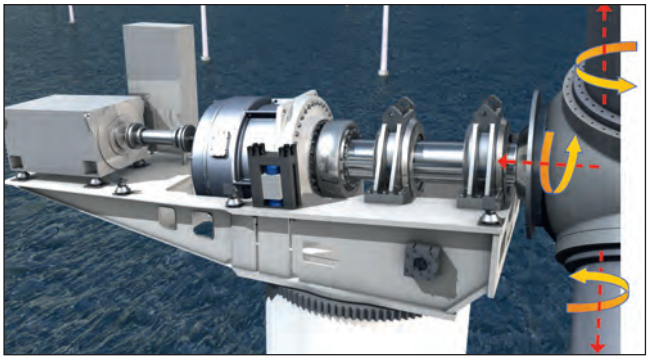


**Bild 1 : Am Rotor wirkende Kräfte am Beispiel einer WEA mit Vier-Punkt-Lagerung**

Neben dem zur Energieerzeugung notwendigen Drehmoment des Rotors einer Windkraftanlage treten weitere Kräfte und Momente am Rotor auf. Diese werden hauptsächlich durch die ungleichmäßige Anströmung des Rotors über die vom Rotor überstrichene Fläche und durch den Turmschatten erzeugt.
Jedes Rotorblatt wird pro Umdrehung von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen beaufschlagt. Somit entstehen zusätzliche wechselnde Kräfte und Momente am Rotor, die vom Rotor auf die Maschine übertragen werden müssen. Bei heutigen Rotordurchmessern, die inzwischen die 100-Meter-Marke teilweise deutlich überschritten haben, ist dieser Einfluss des unterschiedlichen „Wetters“ über der Rotorfläche entsprechend stark ausgeprägt.
Für einen ruhigen Lauf und eine lange Lebensdauer von Windkraftanlagen ist es deshalb zunehmend wichtiger, möglichst alle diese äußeren Kräfte von den sensiblen Maschinenbau Komponenten einer Windkraftanlage fern zu halten. Das geschieht, abhängig vom Anlagentyp auf unterschiedliche Weise. Neben einigen Sonderkonstruktionen wird grundsätzlich zwischen Drei-Punkt-Lagerung und Vier-Punkt-Lagerung unterschieden.

### Vier-Punkt-Lagerung:

Die Vier-Punkt-Lagerung ist so aufgebaut, dass alle Lasten direkt vom Hauptlager in den Maschinenträger und von diesem direkt über das Azimutlager in den Turm übertragen werden. Das hat zunächst den Anschein, dass Getriebe und Generator nur durch Drehmoment belastet werden.
Die am Rotorlager auftretenden hohen Kräfte und Momente haben jedoch eine nicht vermeidbare Verformung des Maschinenträgers zur Folge. Diese Verformungen zwischen Rotorwelle und Maschineträger werden über die elastische Getriebelagerung in das Getriebe übertragen. Zu der Verformung des Maschinenträgers addieren sich die tatsächlich vorhandenen Fertigungstoleranzen. Diese bestehen aus der gesamten Toleranzkette zwischen Hauptlager und Getriebe. Durch diese Toleranzen werden bereits während der Montage des Getriebes Zwangskräfte in vertikaler Richtung auf das Hauptlager und das Getriebe aufgebracht. Diese wirken je nach Toleranzlage nach oben oder nach unten.
Da die elastischen Drehmomentstützen das Antriebsdrehmoment bei möglichst kleiner Verdrehung des Getriebes übertragen müssen, ist eine Mindeststeifigkeit der elastischen Drehmomentstützen erforderlich.
In diesem realitätsnahen Beispiel mit einer konventionellen Elastomerlagerung wirken 3000kN in vertikaler Richtung auf das Getriebe. Die Lastrichtung hat eine toleranzabhängige Mittellage und schwingt in ± vertikaler Richtung. Beim Getriebe trifft diese Lastschwankung zuerst auf das sensible Planetenträgerlager der ersten Getriebestufe. Dabei entstehen am Planetenträger-Lager auch lastfreie Zustände, die zum „Anschmieren“ der Wälzkörper führen können.

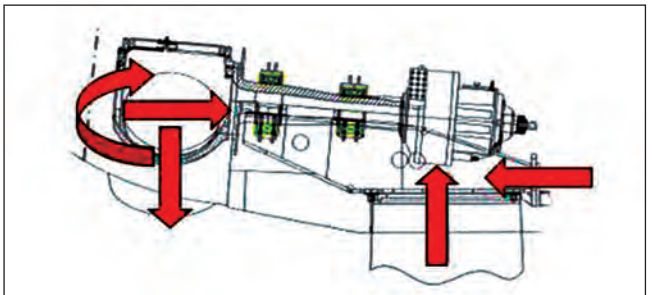


**Bild 2 : Momente und Kräfte am Rotor erzeugen Kräfte auf die Getriebelagerung**

### Beispielhafte Lastrechnung für Getriebe mit Standard-Lagerung:

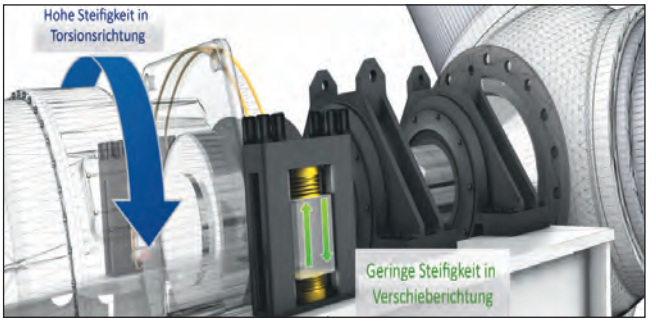
| | |
|---|---|
| Vertikale Steifigkeit der Drehmomentstütze | 300kN/mm |
| Montagefehler | +1mm |
| Verformung des Maschinenträgers | 4mm |
| => vertikale Last auf das Getriebe | 5mm x 300kN/mm x 2 = **3000kN** |

### Beispielhafte Lastberechnung für Getriebe mit Elastomerhydraulik-Lagerung:

| | |
|---|---|
| Vertikale Steifigkeit der Drehmomentstütze | 30kN/mm |
| Montagefehler | +1mm |
| Verformung des Maschinenträgers | 4mm |
| => vertikale Last auf das Getriebe | 5mm x 30kN/mm x 2 = **300kN** |

Zur Reduzierung dieser Lasten hat ESM eine elastomerhydraulische Drehmomentstütze entwickelt. Durch den Austausch einer in den Elastomerlagern hermetisch eingeschlossenen Flüssigkeit zwischen den mit Leitungen diagonal verbundenen Elastomerlagern erfolgt ein Lastausgleich, so dass die elastischen Getriebelager fast nur das Drehmoment übertragen und die Zwangskräfte auf etwa 10% der konventionell wirkenden Zwangskräfte reduziert werden.
Das mechanische Ersatzsystem ist als Hydraulikelement mit einer in Reihe geschalteten Elastomerfeder darstellbar. Parallel zu diesem Gesamtsystem wirkt eine Elastomerfeder mit einer deutlich geringeren Steifigkeit (siehe Bild 4).

**Bild 3 : Elastomerhydraulik-System mit kleiner Verschiebesteifigkeit (grüne Pfeile) und 10-fach höherer Torsionssteifigkeit (blauer Pfeil)**



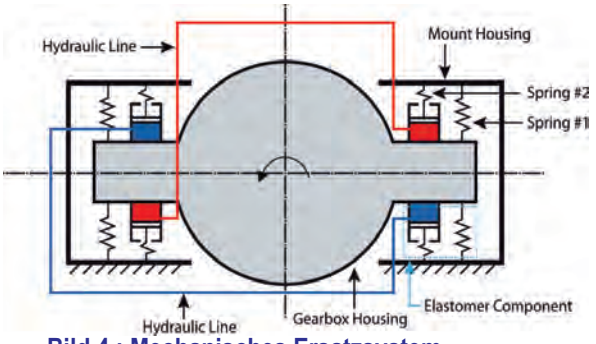



**Bild 4 : Mechanisches Ersatzsystem der Elastomerhydraulik**

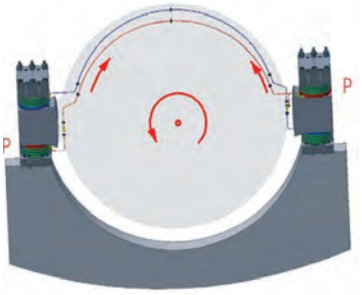



**Bild 5 : Torsionale Kräfte bei der Elastomerhydraulik**

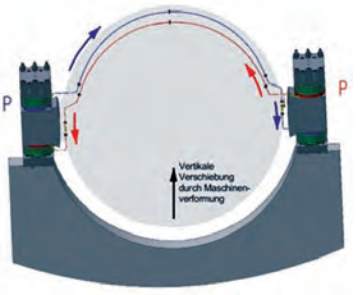



**Bild 6 : Torsionale Verschiebung bei der Elastomerhydraulik**

## Funktionsbeschreibung der Elastomerhydraulik

Beim Aufbringen des Antriebs-Drehmomentes wird jeweils gegen den Flüssigkeitsdruck des diagonalen Elementes gedrückt. Somit erfolgt keine Flüssigkeitsbewegung. Die Steifigkeit und Dämpfung des Elastomerhydraulik-Elementes verhalten sich wie bei einem konventionellen Elastomerbauteil.

Bei vertikaler Verschiebung erfolgt ein diagonaler Flüssigkeitsaustausch. Damit ist eine vertikale Verschiebung auch unter anstehendem Drehmoment mit geringer Kraft möglich, aufgrund der Flüssigkeitsbewegung in den Leitungen.

## Konventionelle Systeme zur Reduzierung der Zwangskräfte

Die Tabelle rechts zeigt die bisher eingesetzten Möglichkeiten zur Reduzierung der Zwangskräfte, die alle in Windkraftanlagen verwendet werden.

## Elastomerhydraulische Kupplung

Die rotierende Entkopplung des Triebstrangs mit radialem Freiheitsgrad war bisher nur mit einer Zweischeibenkupplung möglich. Aus Kosten- und Platzgründen wird deshalb bisher häufig auf eine radial verschiebbare Kupplung zwischen Rotor und Getriebe bzw. bei direkt getriebenen Anlagen zwischen Rotor und Generator verzichtet. Durch die Entwicklung der elastomerhydraulischen Kupplung von ESM ergeben sich neue Perspektiven. Die Hydraulikkupplung basiert auf dem gleichen System wie die hydraulische Entkopplung der Vier-Punkt-Lagerung. ESM ist es gelungen, mit Hilfe der Elastomerhydraulik die Funktion der radialen Verschiebbarkeit in nur einer Kupplungsebene zu realisieren. Kosten- und Platzbedarf für eine radiale verschiebbare Kupplung halbieren sich etwa bei diesem System.

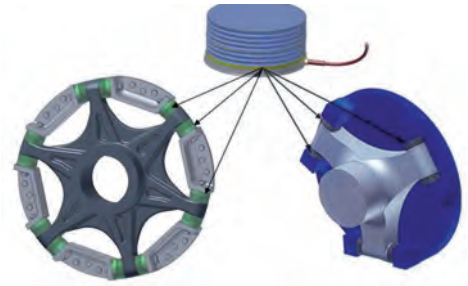
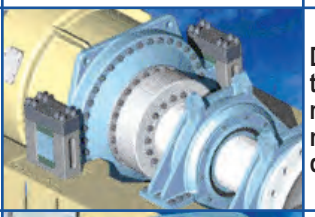
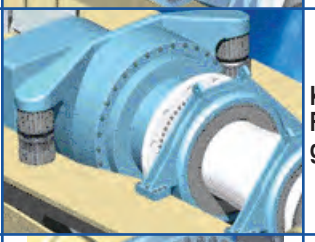
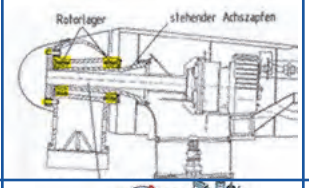
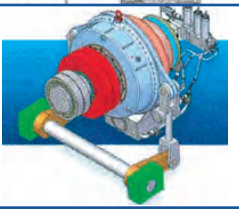


**Bild 7 : Elastomerhydraulische Kupplung mit 6-fach Stern (links) und 3-fach Stern (rechts)**

**Tab 1 : Möglichkeiten zur Reduzierung der Zwangskräfte**

| Getriebelagerung | Skizze | Eigenschaften |
|---|---|---|
| Steif und optimal ausgerichtet | | Gewicht und Kosten nicht realisierbar |
| Einschichtige Gummifedern | | Vertikal und horizontal hohe Steifigkeit in allen Richtungen |
| Mehrschichtige Gummifedern (ESM-Drehmomentstütze) |  | Das Lagersystem ist in vertikaler Richtung verhältnismäßig steif und trägt deshalb nur wenig zur Reduzierung der Zwangskräfte bei. |
| In allen Achsen weiche Getriebelagerung (ESM-Pendelstütze) |  | Kleine Rückstellkräfte in alle Richtungen, große Bewegungen des Getriebes |
| Pendelnd aufgehängtes Getriebe (ESM-Kupplung) | | Aufnahme aller Gier- und Nickmomente im Hauptlager. Getriebelagerung überträgt nur das Antriebsmoment. Keine Zwangskräfte |
| Pendelnd aufgehängtes Getriebe (ESM-Kupplung) |   | Aufnahme aller Gier- und Nickmomente im Hauptlager. Getriebelagerung überträgt nur das Antriebsmoment. Keine Zwangskräfte |
| Lenkerlagerung des Getriebes |  | Zwangsfreie Lagerung, jedoch hoher Kosten- und Wartungsaufwand durch viele unter Last bewegte Bauteile. Das System wird deshalb nur selten eingesetzt. |

Bei radialer Verschiebung zwischen Antriebsscheibe und Abtriebsscheibe wird die Flüssigkeit in der Elastomerhydraulik in die Lager der jeweils gegenüberliegenden Elemente verschoben, so dass bei gleich bleibender torsionaler Steifigkeit eine lastreduzierende Radialverschiebung ermöglicht wird. Beim Verschieben der Flüssigkeit durch entsprechend ausgelegte Kanäle werden radiale Schwingungen des Triebstranges bedämpft.

Ein besonderer Reiz besteht darin, dass beim Auftreten von kurzzeitigen Lastspitzen, wie zum Beispiel im Kurzschlussfall,

die Flüssigkeit aus den Elastomerelementen abgelassen werden kann. Dadurch erfolgt über den Zeitraum der Lastspitzen ein Abknicken der Steifigkeitskennlinien. Bei der geringeren Steifigkeit sind somit entsprechende torsionale Verformungen möglich. Kurzzeitige Lastspitzen in der Kupplung werden kompensiert. Das Ablassen der Flüssigkeit kann mithilfe eines Überdruckventils geschehen, welches bei Lasten größer Nennlast öffnet. Idealerweise wird die Flüssigkeit jedoch direkt in einen Hydrospeicher geleitet. Der Vordruck im Hydrospeicher wird dazu geringfügig höher eingestellt als der bei Nennlast herrschende Druck in den Elementen der Elastomerhydraulik. Somit ist gewährleistet, dass bei Lastspitzen die Druckflüssigkeit in die Hydrospeicher abfließt und sofort nach Ende der Lastspitzen wieder in die Elastomerelemente zurückfließt. Es wird ein unterbrechungsfreier Betrieb gewährleistet. Aufgrund der beim Verschieben der Flüssigkeit auftretenden hohen Dämpfung kann sich das tordierende System nicht aufschaukeln.
Dieses System wurde bereits in Windkraftanlagen mit Getriebe und in direkt getriebenen Windkraftanlagen mit langsam drehenden Generator realisiert.

## Elastomerhydraulisches Stützlager

In jüngster Zeit finden Windkraftanlagen mit mittelschnellen Generatoren steigende Beachtung. Dabei ist der Generator in der Regel fest mit dem Getriebe verbunden. Durch das zusätzlich am Getriebe angebrachte Generatorgewicht verschiebt sich der Schwerpunkt der gesamten Getriebe-Generator-Einheit weit nach hinten. Das dadurch entstehende Nickmoment des Generators nach hinten erfordert eine Abstützung des Generators.
Anforderung an diese Stütze ist die Aufnahme des Generatorgewichtes. Da sich der Generator bei jeder Art der Getriebelagerung relativ zum Maschinenträger bewegt und nur möglichst kleine dynamische Kräfte auf den Generator und den Maschinenträger erwünscht sind, muss das erforderliche Stützlager sehr weich sein. Das wäre zum Beispiel mit einer sehr langen Stahlfeder möglich, die jedoch aufgrund der hohen Kräfte und Verformungen sehr groß bauen würde.
Die Alternative ist die neu entwickelte elastomerhydraulische Stützlagerung von ESM. Diese kann bei kleiner Steifigkeit hohe Kräfte in kleinem Einbauraum übertragen. Zum Erreichen des großen Federweges verdrängt die im Elastomer befindliche Flüssigkeit ein in einem angeschlossenen Membranspeicher befindliches Luftvolumen, welches als zusätzliches Federelement dient. Somit sind geringe Steifigkeiten bei großen Kräften in kleinem Einbauraum möglich.
Zusammengefasst sind die Vorteile des elastomerhydraulischen Stützlagers:

- Sehr kleine Steifigkeit im Hochlastbereich
- Horizontal weich
- Leicht montierbar
- Kraft einfach einstellbar

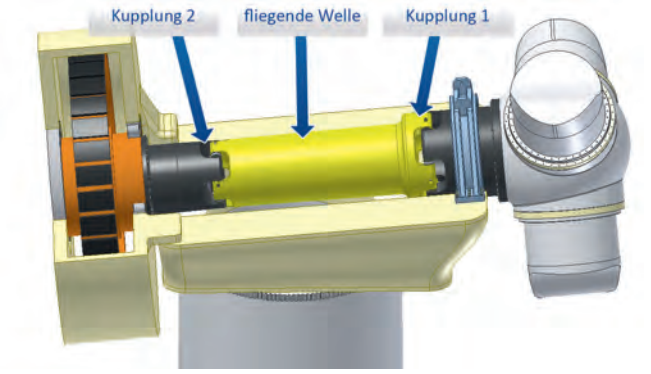



**Bild 8 : Einbaubeispiel einer konventionellen Kupplung mit zwei Ebenen**

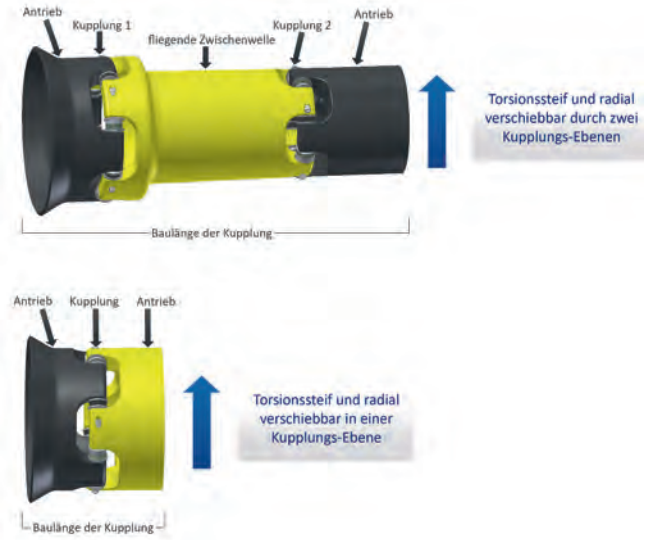



**Bild 9 und 10: Vergleich konventionelle Kupplung und elastomerhydraulische Kupplung in Bezug auf den Bauraum und die Masse. Es wird deutlich, dass eine radiale Verschiebung im Haupttriebstrang aus Platz und Kostengründen nur mit der Elastomerkupplung sinnvoll ist.**

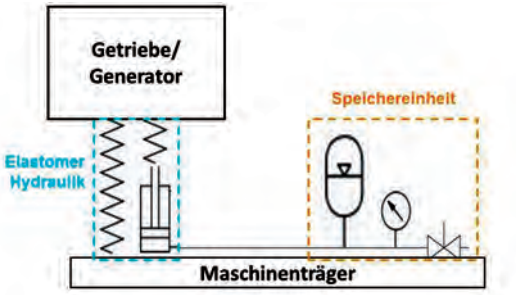



**Bild 11 : Schematische Darstellung des elastomerhydraulischen Stützlagers von ESM**

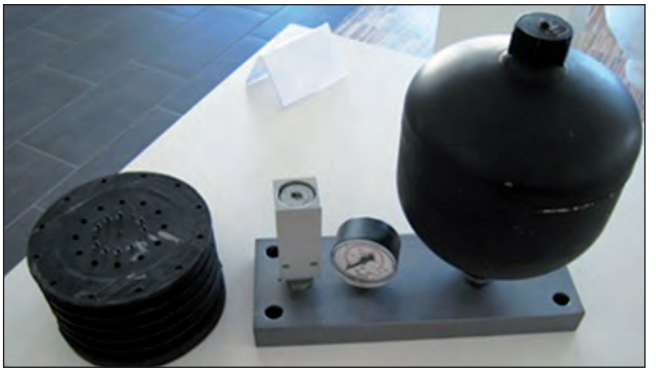
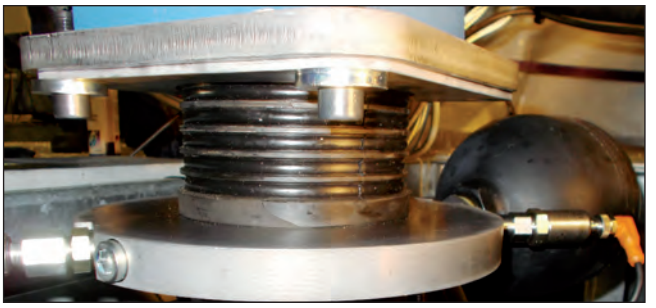


**Bild 12 : Elastomerhydraulisches Stützlager von ESM**
**Bild 13 Unten : Einbaubeispiel in einer 3 MW-WEA**



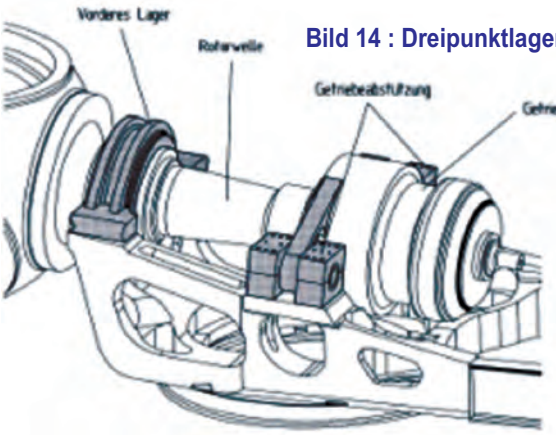



Bild 14 : Dreipunktlagerung

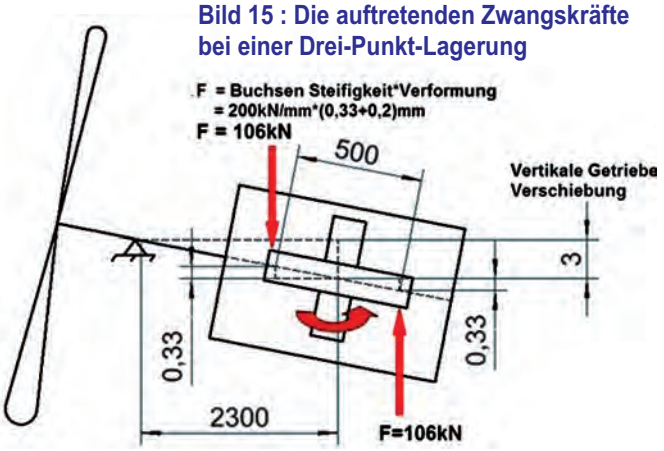



Bild 15 : Die auftretenden Zwangskräfte bei einer Drei-Punkt-Lagerung

Bild 16 : Radialer Einbau einer Spannbuchse in 3 MW Getriebe

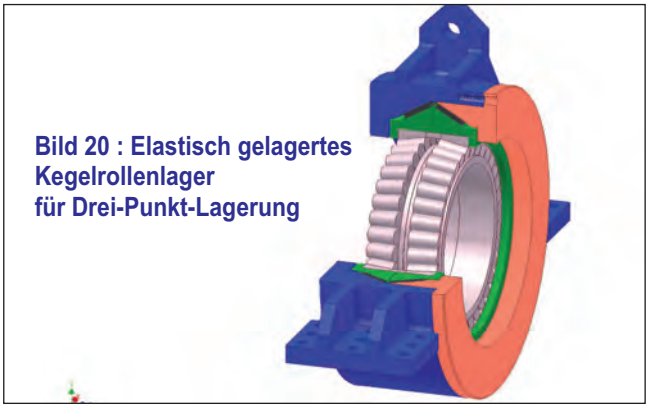


Bild 20 : Elastisch gelagertes Kegelrollenlager für Drei-Punkt-Lagerung

## Drei-Punkt-Lagerung

Die Drei-Punkt-Lagerung ist so aufgebaut, dass sich die am Rotor eingeleiteten Kräfte und Momente auf drei Punkte am Maschineträger verteilen. Zum einem ist das Hauptlager fest mit dem Maschinenträger verbunden. Zum anderen ist das Getriebe mit axial weichen Elastomerbuchsen am Maschinenträger befestigt. Der Kraftfluss erfolgt über Hauptlager und Rotorwelle zum Getriebe. Das Getriebe überträgt die Kräfte aus Nickmoment und Giermoment. Die axialen Zwangsbewegungen von der Rotorwelle auf das Getriebe werden durch die geringe axiale Steifigkeit der Elastomerbuchsen kompensiert.
Dadurch, dass diese Lagerung auf drei Punkten statisch bestimmt ist, treten theoretisch keine Zwangskräfte auf. Bisher werden jedoch in der Regel die Getriebe auf beiden Seiten mit je zwei Lagerböcken gelagert, so dass aus der gewünschten Drei-Punkt-Lagerung tatsächlich eine statisch unbestimmte Fünf-Punkt-Lagerung entsteht.
Am Zahlenbeispiel einer Drei-Punkt-Lagerung (Bild 15) mit den im 2-3 MW Bereich üblichen Abmessungen kann aufgezeigt werden, dass die durch die unbestimmte Lagerung entstehenden Zwangskräfte tatsächlich einen nennenswerten Einfluss haben.
Selbst bei der Annahme sehr enger Bearbeitungstoleranzen entsteht durch die Aufsummierung aller in der Toleranzkette beteiligten Toleranzen an den Lagerböcken eine Mindesttoleranz von ±0,2mm. Durch die vertikale Einfederung des Getriebes entstehen in diesem Beispiel bei der vertikalen Einfederung von 3mm zusätzlich ±0,33mm radiale Verformungen der Buchsen, so dass insgesamt ein vertikales Kräftepaar von etwa 100kN entsteht. Das daraus entstehende wechselnde Moment wirkt horizontal, senkrecht zur Getriebeachsrichtung im Bereich des Hohlrades der ersten Getriebestufe.
Die Reduzierung dieser Zwangskraft ist durch den Einsatz von nur einer Spannbuchse auf jeder Getriebe Seite bei gleichzeitiger Einsparung von Bauteilen (eine statt zwei Buchsen) einfach möglich. ESM hat dazu Spannbuchsen entwickelt, die mit Hilfe einer entsprechenden Vorrichtung im Auge des Getriebearms heutiger Anlagengrößen montiert werden können.
Alternativ ist es möglich, nur eine Buchse je Seite am Maschinenträger zu befestigen. Dann sind jedoch zwei Drehmomentstützen-Paare am Getriebe erforderlich.

## Elastisch gelagerte Kegelrollenlager für Drei-Punkt-Lagerung

Das bei der Drei-Punkt-Lagerung verwendete Pendelrollenlager hat besonders bei großen Wellendurchmessern ein nicht unerhebliches Axialspiel. Bei der dadurch möglichen axialen Bewegung neigt das Lager zum Anschlagen, was zur Stoßbelastung am Hauptlager und insbesondere an dem an der Rotorwelle befestigten Getriebe führt. Deshalb wurde ein Elastomerlager entwickelt, welches den Einsatz von Kegelrollenlagern ermöglicht. Die bei der Drei-Punkt-Lagerung nötige kardanische Bewegung des Lagers wird von dem Elastomerlager übernommen. Das Elastomerlager ermöglicht einen ähnlichen axialen Federweg wie das Pendelrollenlager, jedoch trägt die Einfederung aufgrund der Federkennlinie zur Entlastung des Systems bei. Selbst bei Extremlasten wird die Kraft stoßfrei innerhalb der progressiven Kennlinie des Elastomerlagers übertragen.
Ein weiterer Vorteil ist die gleichmäßige Belastung der Wälzkörper bei der Umdrehung, die bei herkömmlichen Lagern nicht gegeben ist, da das Lagergehäuse an den Befestigungspunkten zum Maschinenträger deutlich steifer ist.

Bild 17 : Mit neun M16-Schrauben vorgespannte Buchse

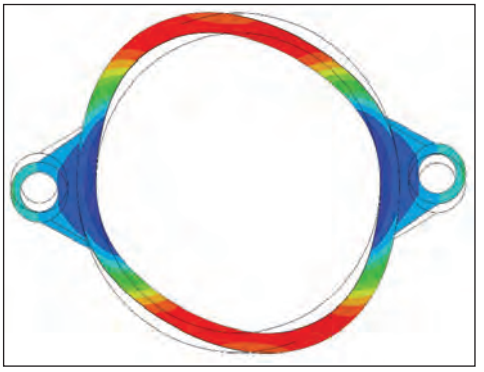


Bild 18 : Ungleichförmige Belastung im Bereich des Hohlrades bei Getrieben mit Drehmomentstützen

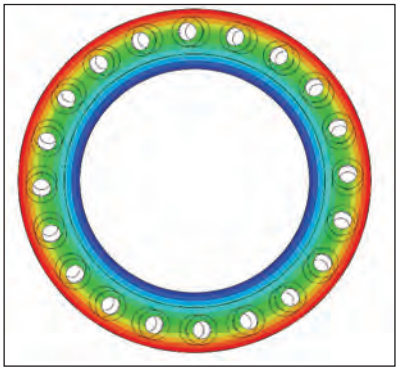


Bild 19 : Gleichförmige Belastung durch kreisförmige Anordnung kleinerer Buchsen am Getriebeumfang

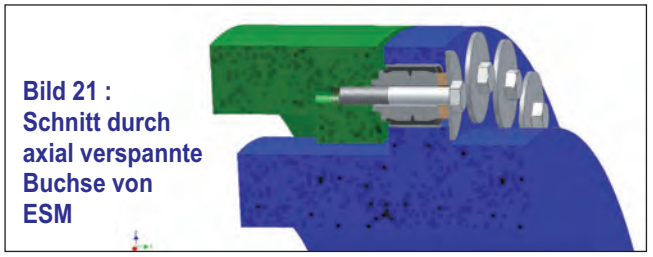


Bild 21 : Schnitt durch axial verspannte Buchse von ESM

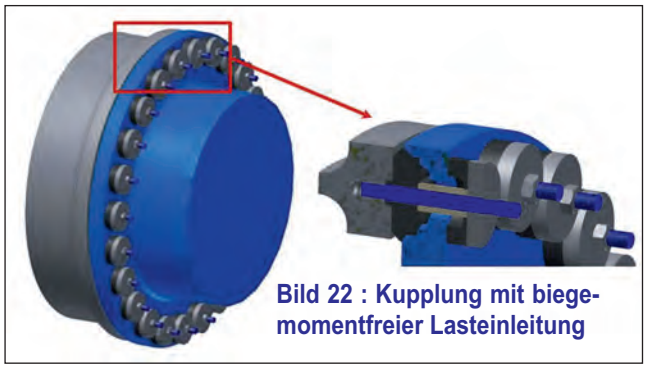
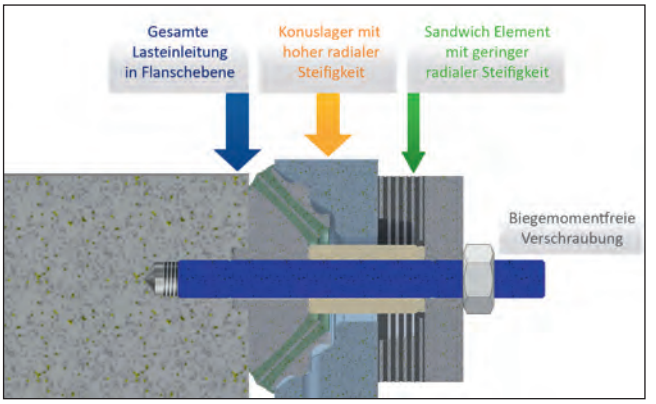


Bild 22 : Kupplung mit biegemomentfreier Lasteinleitung

Bild 23 : Kupplung mit biegemomentfreier Lastübertragung durch gezielte Steifigkeitsverteilung in den Elastomer Elementen




### Zusammengefasst lauten die Vorteile des elastisch gelagerten Hauptlagers:

- Reduzierung und Dämpfung axialer Bewegung
- Gleichförmige Lasteinleitung in das Wälzlager
- Verwendung kleinerer, kostengünstigerer Kegelrollenlager statt Pendelrollenlager
- Kostengünstiger Einsatz von Hohlwellen
- Körperschallisolation
- Größere Toleranzen möglich
- Einfachere Dichtung aufgrund kleiner Relativbewegungen

Die Elastische Lagerung von Wälzlagern bietet sich weiterhin auch zur Vermeidung von Zwängen in Vier-Punkt-Lagerungen sowie zur Planetenträger- und Planeten-Lagerung an.

### Axial verspannbare Buchsen

Alternativ zur radial verspannbaren Buchse hat ESM auch axial verspannbare Buchsen entwickelt. Durch Verdrängung des Elastomers im mittleren Bereich der Buchse spannt sich die Buchse von selbst vor. Das kann wie in Bild 21 veranschaulicht gleichzeitig mit der axialen Befestigung der Buchse geschehen. Alternativ können eine oder mehrere zusätzliche Schrauben verwendet werden (Bild 17), um die Buchse unabhängig von der Einbausituation vorzuspannen. Gegenüber konventionell eingepressten Buchsen lassen sich die Buchsen einfach montieren und demontieren. Je nach Anwendungsfall können die Buchsen mit mehreren kleinen Schrauben und leichtem Werkzeug oder auch mit einer zentralen Schraube mit Drehmoment- Schrauber oder Ziehzylinder verspannt werden.
Aufgrund der einfachen Montage können diese Buchsen einfach am Getriebeumfang befestigt werden. Dadurch entsteht eine gleichmäßige Lasteinleitung in das Getriebe. Das Getriebegehäuse und damit das Hohlrad der sensiblen ersten Planetenstufe werden weniger belastet (Bild 18 und 19).
Gleichzeitig entfallen die sehr schwingungsanfälligen Getriebestützen.

### Kupplung mit biegemomentfreier Lasteinleitung

Bei fliegenden Kupplungen für große Drehmomente besteht bisher das Problem großer Biegemomente im Bolzen, so dass der Bolzen einen wesentlichen Kosten- und Gewichts-Faktor darstellt.
Deshalb hat ESM zur Übertragung der Lasten eine Kombination aus Sandwich-Schichtfeder und Konuslager entwickelt (Bild 22 und 23). Dadurch, dass die Sandwichelemente in Torsionsichtung nur einen Bruchteil der Steifigkeit der Konuslager haben, verschiebt sich die Lasteinleitung in Richtung des Konuslagers. Das Konuslager wiederum projiziert die radialen Kräfte in die Flanschebene. Damit ist der Verbindungsbolzen in radialer Richtung lastfrei. Solche Kupplungen werden im Wesentlichen zur Übertragung des Drehmomentes, sowie der Nick-und Gier-Kräften von Windkraftanlagen eingesetzt, bei denen das Rotorlager im Getriebegehäuse integriert ist. Über die Kupplung werden sämtliche Rotorkräfte vom Getriebegehäuse in den Maschinenträger übertragen.

**ESM Energie- und Schwingungstechnik Mitsch GmbH**
**Auf der Rut 5,**
**D-64668 Rimbach-Mitlechtern**
**Tel.: +49 (0) 62 53 /9 88 5- 0**
**Fax: +49 (0) 62 53 /9 88 5- 50**
**www.esm-gmbh.de**