

Fachaufsatz, erschienen in:

Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe

Jahrgang 64 (2012) Heft 1/2, Seiten 71-74

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Dr. h.c. Werner Hufenbach

Dr.-Ing. Olaf Helms

Dr.-Ing. Andreas Ulbricht

Dipl.-Wirt.-Ing. Thomas Behnisch

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik - ILK

Technische Universität Dresden

Holbeinstr. 3, 01307 Dresden

Tel.: 0351 463 38142

Fax: 0351 463 38143

E-Mail: ilk@ilk.mw.tu-dresden.de

Konstruktion eines Schwerlastprüfstands für große Schiffswellenlager

Die meisten großen Passagierschiffe und immer mehr Fracht- und Spezialschiffe werden mit sogenannten Pod-Antrieben ausgestattet, da diese Antriebskonfiguration mit frei drehbaren Motor-Propeller-Gondeln unter dem Heck des Schiffes hohe Effizienz und beste Manövrierfähigkeit gewährleistet. Der Einstieg in diese Antriebskonfiguration führt zu neuen technischen Herausforderungen, da der komplette Antriebsstrang nun auf sehr engem Bauraum realisiert werden muss. So etwa können die klassischen hydrodynamischen Wellenlager kaum mehr integriert werden. Vielmehr sind neue kompakte Schiffswellenlager zu entwickeln, wobei trotz des reduzierten Bauraums die Tragfähigkeit und die Zuverlässigkeit der klassischen Lager zu erreichen sind. Der Erfolg derartiger Entwicklungen hängt dabei maßgeblich von der Bereitstellung geeigneter Prüftechnik ab. Die TU Dresden hat hierzu einen bedeutenden Beitrag geleistet.

Most of large passenger ships and an increasing number of cargo and special purpose vessels are going to be equipped with so called Pod Drives. These pods feature an electric engine, a drive shaft and a propeller in one housing module and are pivot-mounted below the stern of the ship hull. This innovative concept allows higher efficiency and much better manoeuvrability compared to classic marine propulsion. But the switch to this drive concept comes along with new technical challenges. Especially the classic hydro-dynamic bearings can hardly be integrated. In fact new compact bearings are to be developed so that load capacity and reliability is ensured in spite of the reduced design space. The success of such a bearing development significantly depends on the allocation of appropriate testing equipment. Thereto the Technische Universität Dresden made an important contribution.

Aufgabenstellung

Im Rahmen des BMWi-geförderten Forschungsvorhabens „HYDROS – Lastgesteuertes hydrostatisches Radiallager für Pod-Antriebe“ hat das Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden die Aufgabe übernommen, einen Schwerlastprüfstand für große Schiffswellenlager zu entwickeln und aufzubauen. Die Erfahrungen des Instituts auf den Gebieten „Methodische Konstruktion“ und „Strukturmechanik“ kamen dabei vorteilhaft zur Geltung. Eine umfangreiche Anforderungsliste wurde vom Verbundkoordinator, der Blohm + Voss Industries GmbH (BVI), erarbeitet und bereitgestellt. Darüber hinaus konnte BVI Spezifikationen und Erfahrungswerte aus eigenen Prüfprogrammen beisteuern. Die Auslegung des hydraulischen Systems war Aufgabe des Instituts für Fluidtechnik der TU Dresden (IFD). Spezifikationen zum Prüflager kamen vom Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Universität Rostock.

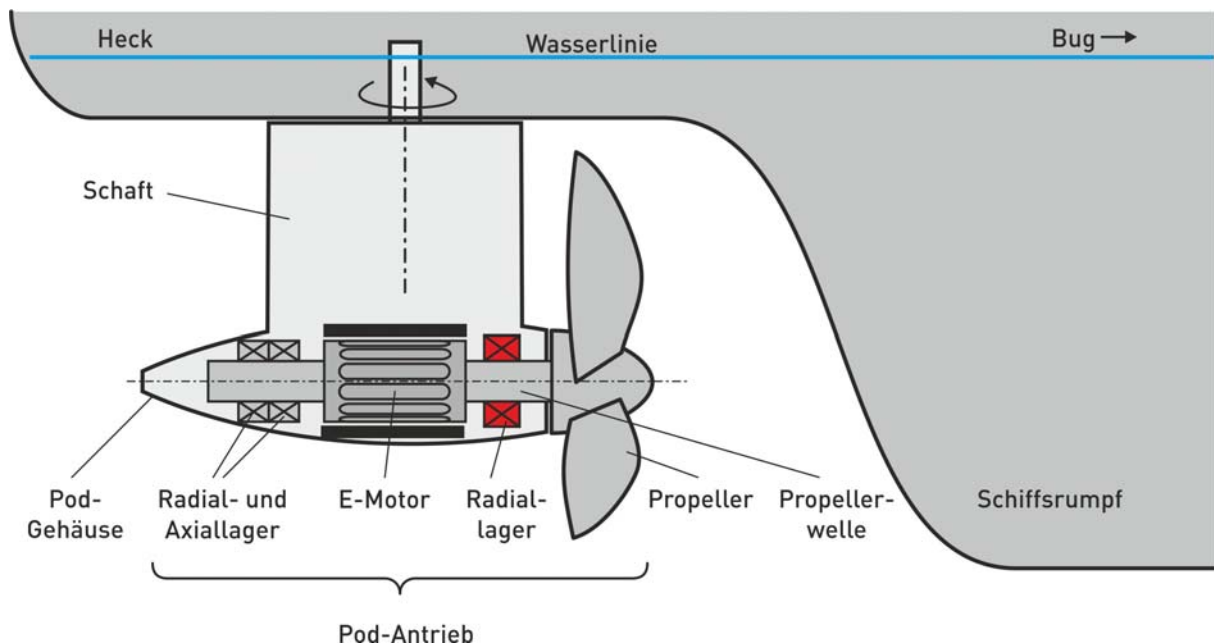


Bild 1 Position und wesentliche Elemente eines Pod-Antriebs für große Seeschiffe

Das wesentliche Ziel des Teilprojekts „Schiffswellenlagerprüfstand“ bestand in der Bereitstellung eines Prüfaufbaus, mit dem die wesentlichen Betriebsbedingungen des Radiallagers eines Pod-Antriebs realitätsnah nachgebildet werden können. Neben den hohen radialen Lagerkräften, die mit unterschiedlichen Frequenzen wechselnd und umlaufend auftreten, war vor allem eine Axialschwingung der Welle mit Amplituden von bis zu einem Millimeter zu realisieren. Derartige Axialschwingungen resultieren im realen Betrieb etwa aus den strömungsmechanischen Wechselwirkungen von Propellerblättern und Gondel-Schaft des Pod-Antriebs. Weitere Anforderungen an den Prüfstand ergaben sich aus den Erwartungen an einen effizienten und sicheren Prüfbetrieb. So etwa sollte das Prüflager relativ schnell und einfach zu wechseln sein. Generell sollen neue Lager- und Dichtungsprodukte mit hoher Überzeugungskraft geprüft und demonstriert werden können.

Konzeptfindung

Nach dem Klären der wesentlichen Anforderungen folgte eine Konstruktionsphase zur Ermittlung geeigneter mechanischer Konzepte für den Lagerprüfstand. Das Ziel besteht darin, in einem Prüflager eine Welle zu drehen und dabei eine Radiallast zu übertragen. Dazu wird eine Prüfstandswelle benötigt, die neben dem Prüflager noch zwei weitere Lagerstellen aufweist. Die Radialkräfte an den Lagerstellen führen dann zu einer Dreipunkt-Biegebelastung der Welle und des Prüfgestells. Bei der

Bestimmung der Lagerreihenfolge wurden zunächst zwei Varianten verfolgt: Realitätsnahe Anordnung wie im Pod-Antrieb (A) sowie montage- und wartungsfreundliche Anordnung des Prüflagers am Wellenende (B) (vgl. Bild 2 und Bild 3).

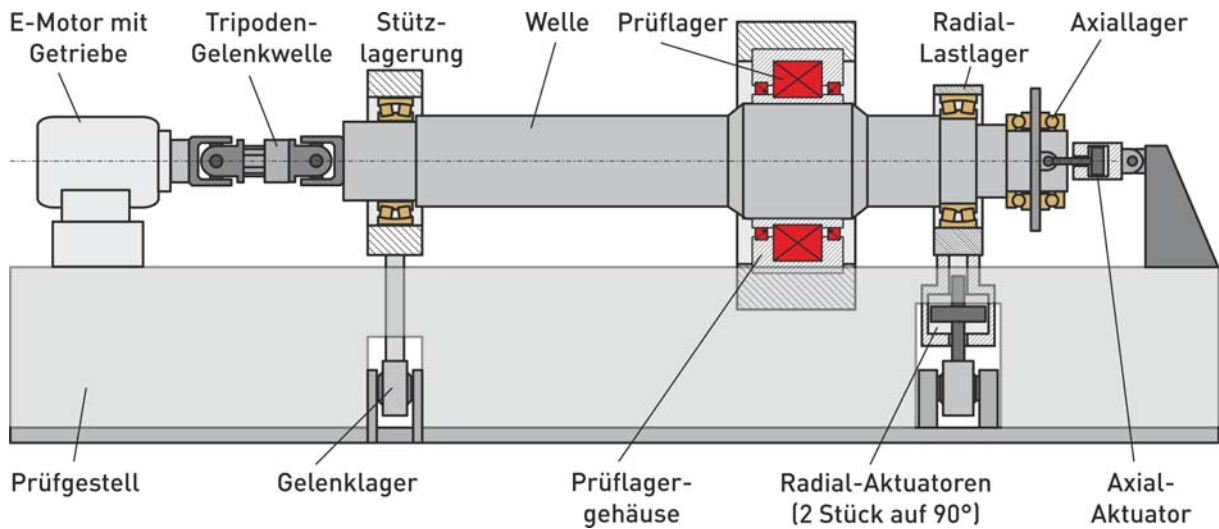


Bild 2 Prüfstandskonzept A: 3-Achsen-Steuerung, Orientierung des Aufbaus am realen Pod-Antrieb

Die Prüflasten sollten über hydraulische Aktuatoren aufgebracht werden. Dazu sind zwei Lagerböcke direkt mit dem Prüfgestell zu verbinden. Das dritte Lagergehäuse wird dann über zwei, um 90° versetzte Querkraft-Aktuatoren mit dem Prüfgestell gekoppelt. Dabei besteht die Möglichkeit, die Querkräfte direkt in das Prüflagergehäuse oder auch in ein benachbartes Lager einzuleiten. Für einen realitätsnahen Aufbau gemäß Lösungsansatz A ist die Lasteinleitung in einem benachbartem Lager vorzusehen, wobei hier die radialen Lasten der Propellerebene dargestellt werden. Bei Lösungsansatz B bietet sich eine Lasteinleitung direkt in das Prüflagerschild an.

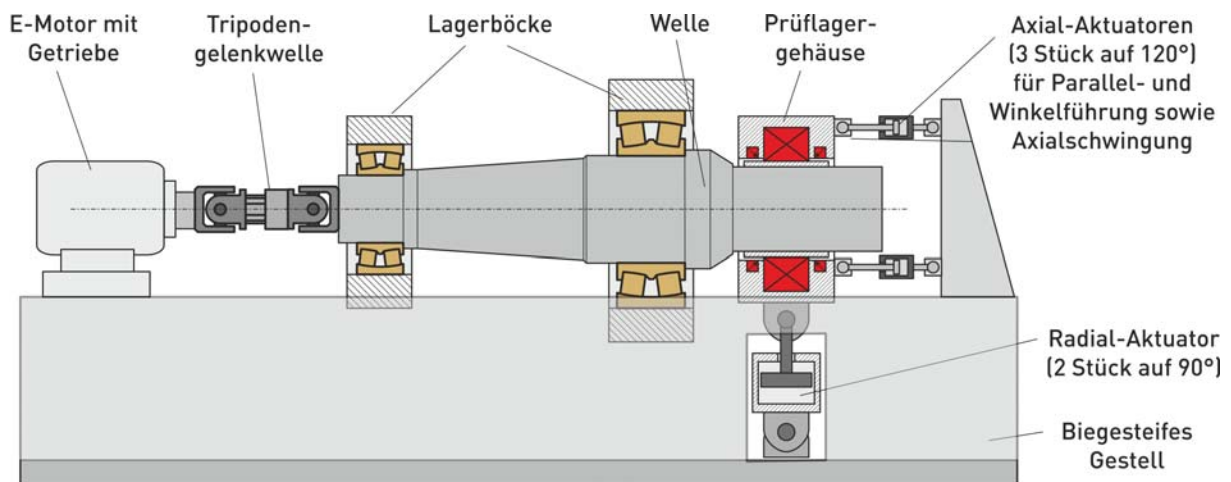


Bild 3 Prüfstandskonzept B: 5-Achsen-Steuerung, modifizierte Lageranordnung für einfache Prüflagerwechsel

Die wichtigste Nebenfunktion des Prüfstands ist in der Axialschwungung zwischen Welle und Prüflager zu sehen. Dazu kann entweder das Prüflagergehäuse oder auch die Prüfstandswelle axial bewegt werden. Die beiden grundlegenden Konzepte wurden dementsprechend ergänzt, wobei die Anregung der Welle als realitätsnäher betrachtet wird (A), während die Anregung des Prüflagergehäuses aufgrund der geringeren bewegten Masse einen einfacheren Prüfaufbau gestattet (B). Darüber hinaus bietet es sich an, bei Konzept B das Prüflagergehäuse mit drei parallelen Axial-Aktuatoren zu betätigen, da so auch eine Wellenschiefstellung gezielt simuliert werden kann. Ein

derartiger Aufbau führt zu einem 5-Achsen-Prüfstand, bei dem sich alle relevanten Freiheitsgrade des Lagergehäuses gegenüber der Welle betätigen lassen.

Bei der Konzeptauswahl spielte nicht nur die Funktionalität des Prüfstands sondern auch die spätere Vermarktungsfähigkeit der Prüfergebnisse in der Schiffbaubranche eine entscheidende Rolle. Ausschlaggebend für die Konzeptauswahl war also die realitätsnähere und anschaulichere Gesamtkonfiguration von Konzept A.

Entwurf und Auslegung

Beim weiteren Entwurf des Prüfstands kamen Versuchsfeld-Erfahrungen des Projektpartners BVI zum Tragen. So etwa wurde der Wunsch aufgegriffen, ein möglichst universelles wannenförmiges Prüfgestell mit Montageflächen auf dem Wannen-Rand zu realisieren. Die Montageflächen sollten T-Nuten aufweisen, um die weiteren Prüfstand-Module aufzunehmen. Zu diesen Modulen zählen vor allem der Prüflagerbock, das Stützlagerschild, die Motorhalterung und die Axiallast-Einheit. Die beiden großen servohydraulischen Radiallast-Aktuatoren mit jeweils 1.300 kN Zug- und Druckkraft müssen wegen des hohen Bauraumbedarfs in eigenen Kammern im Prüfgestell untergebracht werden. Repräsentative Querschnitte zeigt Bild 4.

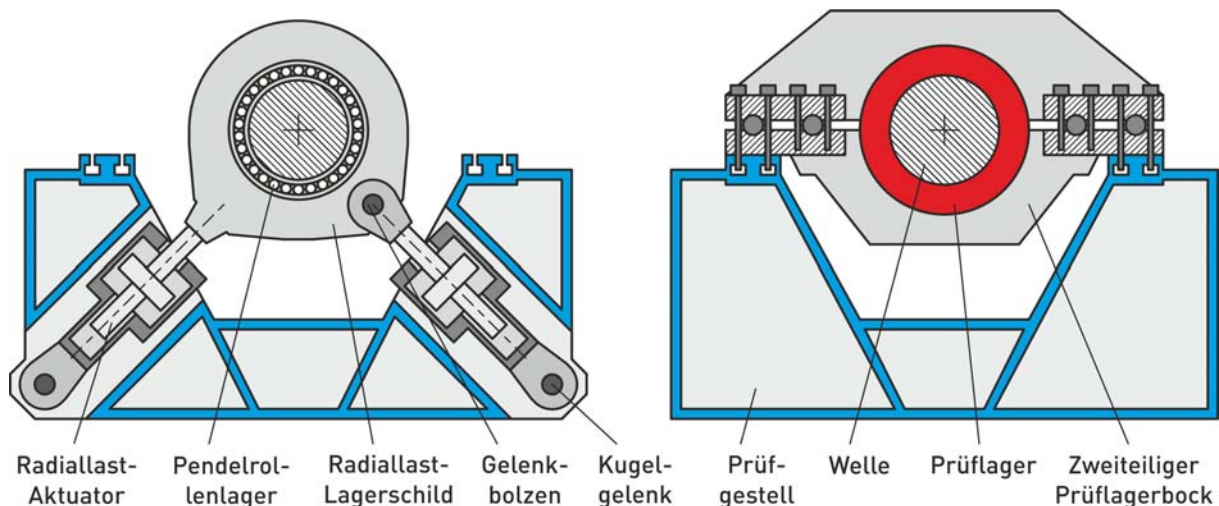


Bild 4 Querschnittsentwürfe des Prüfstands: Radiallast-Ebene mit zwei Gleichgang-Hydraulikaktuatoren und statisch bestimmter Aufhängung (links); Prüflager-Ebene mit zweiteiligem, verschraubten Lagerbock (rechts)

Aus den hohen Erwartungen hinsichtlich realisierbarer Prüffrequenzen bei hohen Prüfkräften resultierten sehr anspruchsvolle Steifigkeitsforderungen entlang der Hauptlastpfade. So etwa sollte das acht Meter lange Prüfgestell bei maximaler Prüflast nicht mehr als 1 mm Durchbiegung aufweisen. Zugleich sollten Masse und Abmessungen des Prüfstands nicht zu groß ausfallen, um Aspekte wie Transport, Transportwege, Aufstellung und Stellplatz zu berücksichtigen.

Das Tragwerkskonzept für das hochsteife Prüfgestell entspricht einem räumlichen Schubfeldträger. Dabei verteilen Spante die eingeleiteten Lasten auf den aus Schubfeldern gebildeten, hohlen Wannenschnitt. Aufgrund des großen Gestellquerschnitts bezogen auf die Gestelllänge wird relativ einfach eine ausreichende Biegesteifigkeit erzielt. Maßgebend für Bauteilsteifigkeit ist vielmehr die Schubsteifigkeit des Gestells (kurzer Träger). Deshalb ist eine effiziente Anordnung von Schubfeldblechen zu finden und jeweils eine beanspruchungsgerechte Blechstärke zu ermitteln. Diese Aufgabe wurde iterativ mit Hilfe von mehreren Finite-Elemente-(FE-)Simulationen gelöst (Bild 5).

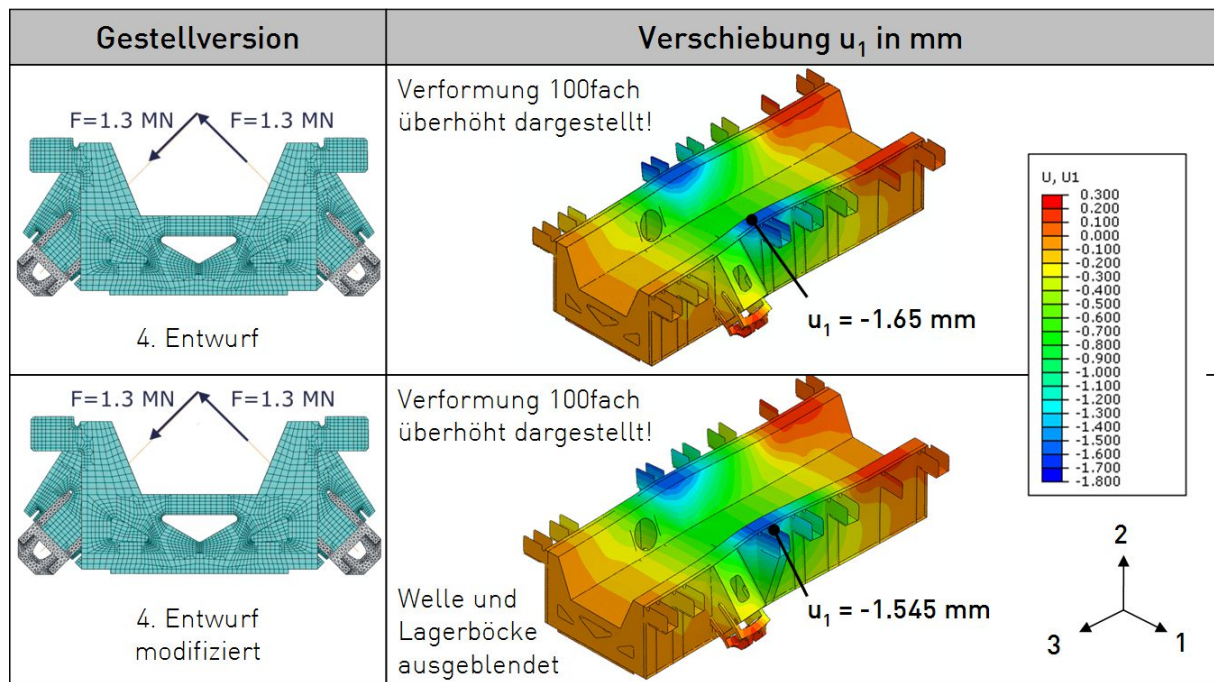


Bild 5 Gestaltung und Dimensionierung des Prüfgestells am Beispiel von Iterationsschritt 4 für den Lastfall „Horizontale Lagerkraft“ (ein Radial-Aktuator zieht, der andere drückt)

Während die Welle in radialer Richtung sehr steif gelagert werden sollte, musste die axiale Führung der Welle mit hoher Nachgiebigkeit realisiert werden. Denn nur so konnte die axiale Schwingbewegung der Welle im Prüfbetrieb realisiert werden. Durch die statisch bestimmte Konfiguration des Radiallastsystems wird die axiale Bewegung der Welle kaum behindert. Jedoch muss auch das Stützlager als drittes Wellenlager der axialen Bewegung folgen. Dazu wurde eine Stützlagerpatrone mit zwei Kegelrollenlagern entwickelt, wobei diese Patrone über ein federelastisches Lagerschild mit dem Prüfgestell gekoppelt ist. Dieses Lagerschild ist als Blattfederpaket aus drei Stahlblechen aufgebaut, wodurch eine hohe radiale Steifigkeit bei gleichzeitig hoher axialer Nachgiebigkeit erreicht wurde. Dabei lässt sich über die gezielte Einstellung der verbleibenden axialen Steifigkeit des Lagerschildes die Eigenfrequenz des Zweimassenschwingers aus Gestell und Welle definieren. Für die Eigenfrequenz-Abschätzung kann die Verbindung zwischen Prüfgestell und Hallenboden vernachlässigt werden, da mit relativ weichen Luftfedern eine ausreichende mechanische Entkopplung gewährleistet ist.

Die axiale Anregung des Systems erfolgt mit Hilfe eines servohydraulischen Gleichgang-Zylinders. Als weitere Herausforderung erwies sich die Aufhängung dieses Aktuators, da nur bei Spielfreiheit eine ausreichende Regelbarkeit gewährleistet ist. Dazu wurden biaxiale Festkörpergelenke aus Blattfederelementen entworfen, womit sich der Axial-Aktuator bei geringer Querkraftbelastung auf das Wellenende ausrichten kann (Bild 6). Die Auslegung dieser Blattfedermodule erfolgte mit Hilfe der Plattentheorie sowie durch FE-Simulationen. Die Verbindung zwischen dieser Axiallasteinheit und der drehenden Welle wurde mit einer vorgespannten Axial-Kugellager-Patrone realisiert.

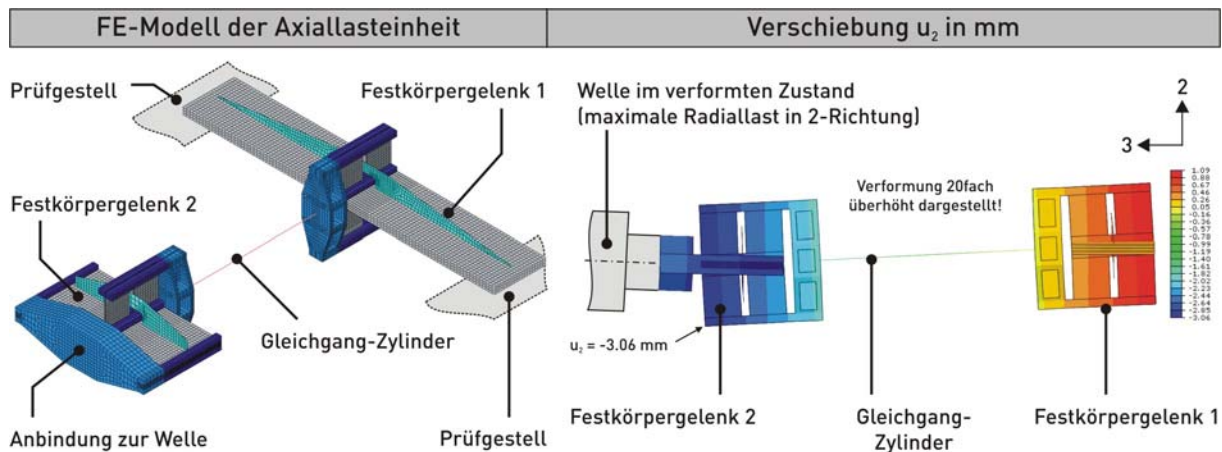


Bild 6 Gestaltung und Auslegung von zwei biaxialen Festkörpergelenken zur spielfreien Ankopplung des Axialzylinders an die Prüfstandswelle

Aufbau und Inbetriebnahme des Prüfstands

Im Laufe der Konstruktionsphase wuchsen kontinuierlich die Prüfstandsabmessungen, um alle geforderten Funktionen und Leistungsdaten erfüllen zu können. Somit war die ursprünglich am ILK für den Prüfaufbau eingeplante Laborfläche nicht mehr ausreichend. Für die Aufstellung des Prüfstands war daher eine Gewerbehalle anzumieten. Keine der angebotenen Gewerbehallen konnte jedoch die Anforderungen an Fläche, Torgröße sowie Strom- und Kühlwasserversorgung erfüllen. Die gewählte Halle bietet immerhin ausreichende Torgröße, Nutzfläche und Höhe, so dass ein Autokran für Montagearbeiten genutzt werden kann. Der benötigte 250-KW-Elektroanschluss musste noch von den Stadtwerken eingerichtet werden. Eine besondere Herausforderung ergab sich durch den Kühlwasserbedarf von ca. zehn Kubikmetern pro Stunde. Der vorhandene Wasseranschluss war dafür nicht ausreichend. Die Verlegung eines neuen größeren Wasseranschlusses wurde von den Stadtwerken verweigert, da sich mit der Prüfaufbau auch Pausenzeiten ergeben und so kein kontinuierlicher Durchfluss gewährleistet ist. Hieraus würden Hygieneprobleme für das Trinkwassernetz resultieren. Gelöst wurde das Problem mit dem Bohren von zwei Brunnenlöchern innerhalb der Gewerbehalle (Quelle und Senke). Der Standort in der sandigen Elbebene gestattet eine ausreichende Ergiebigkeit des Brunnens.

Der Aufbau des Prüfstands begann mit der Anlieferung des Prüfstands auf einem Tieflader sowie mit der Aufstellung und Ausrichtung dieser Komponente auf den pneumatischen Dämpfungselementen zur mechanischen Entkopplung. Das Heben von schweren Bauteilen wurde mit einem Autokran realisiert. Nach dem Zusammenbau der mechanischen Komponenten wurden die hydraulischen und die elektrischen Installationsarbeiten durchgeführt. Abschließend waren noch die Steuerungssoftware und die zugehörigen Sensoren einzurichten. Bild 7 zeigt die Gesamtbaugruppe zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme.

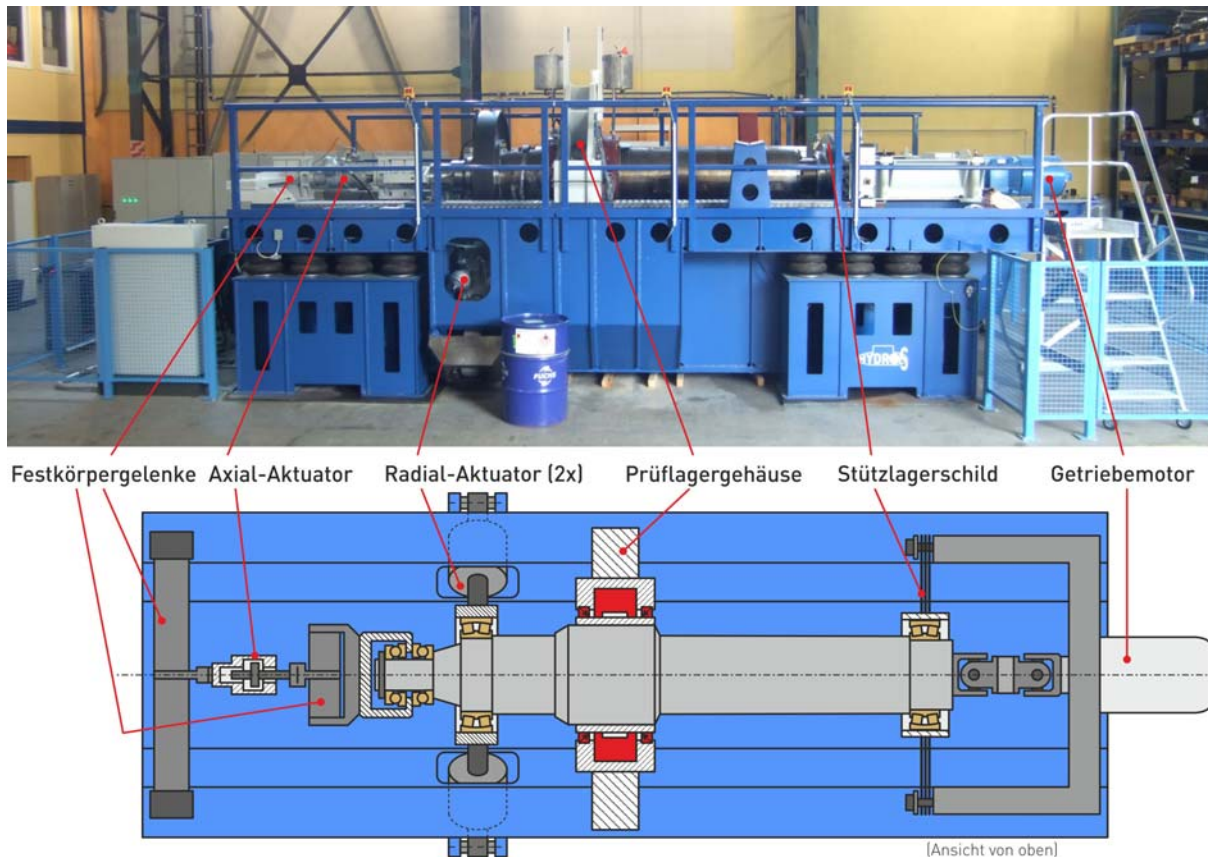


Bild 7 Prüfstand für große Schiffswellenlager: Gesamtaufbau nach Abschluss der Montagearbeiten (oben) und zugehöriges Funktionsschema (unten)

Für die Inbetriebnahme wurde ein erstes lastgesteuertes hydrostatisches Lager eingebaut. Nach einer kurzen iterativen Software-Optimierung konnten alle Prüfstandsfunktionen erfolgreich verifiziert werden. Lediglich die Schiefstellung zwischen Prüfstandswelle und Prüflagerbock fällt bei zunehmender Prüflast geringfügig höher aus als vorausberechnet. Zur Kompensation soll die radiale Steifigkeit des Stützlagerschilds noch etwas gesteigert werden.

Schon die ersten Prüfläufe zeigen, dass mit dem neuartigen Schiffswellenlagerprüfstand ein leistungsstarkes Instrument für die Entwicklung und Erprobung von zukünftigen Lagersystemen und Wellendichtungen bereitgestellt wurde. Im Rahmen des HYDROS-Projekts sind zunächst drei verschiedene lastgesteuerte hydrostatische Radiallager zu prüfen. Zum Prüfumfang gehört z. B. die Ermittlung der statischen Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Wellenschiefstellung. Zudem wird der Einfluss von radialen und axialen Schwingungen auf den Schmierfilmaufbau analysiert. Darüber hinaus können durch Heizelemente auch realitätsnahe Temperaturgradienten im Lagersystem eingestellt werden. Somit lässt sich der Einfluss von temperaturabhängigen Spaltmaßen und Viskositätsänderungen in die Untersuchungen einbeziehen.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und dem Projektträger Jülich für die Förderung dieses faszinierenden Forschungsthemas. Darüber hinaus danken die Autoren den Projektpartnern für die sehr gute Zusammenarbeit.