

Martin Rieger

Einsatz von Axialgelenklagern
und Radialgelenkköpfen bei
Ermüdungsversuchen

Diplomarbeit

Technische Universität Graz

Institut für Leichtbau

Leiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franz Heitmeir

Betreuer:

Ass.Prof.Dipl-Ing.Dr.techn. Christian Moser

Graz, Oktober 2013

Eidesstattliche Erklärung¹

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am _____

Datum

Unterschrift

¹Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008; Genehmigung des Senates am 1.12.2008

Danksagung

Bedanken möchte ich mich vor allem bei Ass.Prof.Dipl-Ing.Dr.techn. Christian Moser, Dipl-Ing.Dr.techn. Thomas Thurner, sowie beim gesamten Team der Schwingprüfhalle für die intensive Unterstützung, die Motivation und die lehrreichen Betreuungsstunden.

Ich widme dieses Buch meinen Eltern, die mich mit viel Liebe und Geborgenheit bis hierher begleitet und mich immer unterstützt haben; meinen Geschwistern, die immer ein offenes Ohr für mich hatten und meiner Partnerin, die mir verständnisvoll zur Seite gestanden ist.

Kurzfassung

Ermüdungsversuche an mechanischen Strukturen und Bauteilen bilden realitätsnah und reproduzierbar für die reale Applikation relevanten Belastungen über eine garantierte Lebensdauer nach. Ein wesentlicher Bestandteil bei der Umsetzung derartiger experimenteller Verifikationen ist ein entsprechender Prüfstand mit eigens dafür konstruierten Vorrichtungen zur Aufnahme des Prüflings sowie zur korrekten Kraftein- und Kraftausleitung. Die wichtigen Koppelstellen zur Kraftein- bzw. Kraftausleitung werden in den meisten Fällen über eine gelenkige Anbindung realisiert, um die spezifizierten Prüfkräfte isoliert an vorgegebener Stelle mit definierter Krafrichtung aufzubringen. Die dabei vorrangig eingesetzten Axialgelenklager und Radialgelenkköpfe sind daher für die Qualität und Reproduzierbarkeit eines jeden Ermüdungsversuches von besonderer Bedeutung.

Im Zuge der vorliegenden Arbeit werden Axialgelenklager und Radialgelenkköpfe hinsichtlich der Eignung im Einsatz bei Ermüdungsversuchen untersucht. Dabei werden im ersten Abschnitt dieser Diplomarbeit am Beispiel einer Festigkeitsprüfung an einem Drehgestell-Rahmen die Anforderungen und Einsatzbedingungen von Gelenklagern herausgearbeitet. Basierend auf den dabei erhaltenen Anforderungen wurde ein spezieller Prüfstand konzipiert und realisiert, um die bei Ermüdungsversuchen eingesetzten Gelenklager zu charakterisieren und hinsichtlich ihrer Lebensdauer abhängig von möglichen Prüfbelastungen zu untersuchen. Der Gelenkprüfstand kann Reibwert und Lagerspiel von Axialgelenklagern und Radialgelenkköpfen für unterschiedliche statische und dynamische Belastungen ermitteln. Mit diesem Prüfstand wurden unterschiedliche Lagertypen verschiedener Hersteller untersucht und verglichen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Eigenschaften der Lager bei zyklischen Belastungsversuchen mit hohen Lastwechselzahlen gelegt, um daraus wichtige Erkenntnisse für den Einsatz in Ermüdungsversuchen mit bis zu 12 Millionen Lastwechseln zu erlangen.

Die Interpretation der erzielten Ergebnisse erlaubt im letzten Teil der Arbeit eine Diskussion der Einsatzmöglichkeiten unterschiedlicher Lagertypen für diverse Prüfstandsanforderungen bei Festigkeits- bzw. Ermüdungsversuchen. Abgeleitet aus den erhaltenen Ergebnissen werden Maßnahmen zur Erhöhung der Einsatzdauer von Gelenklagern vorgeschlagen. Damit können sämtliche gelenkigen Anbindungen bei Prüfstandsaufbauten für deren Eignung bei den jeweiligen Prüfbelastungen prinzipiell spezifiziert, sowie - bei bereits bestehendem Prüfstand - evaluiert werden.

Abstract

Fatigue testing of mechanical structures and components simulates all relevant loads for the real-world application in a realistic and reproduceable manner over its whole life-cycle. Essential for such an experimental verification is the realization of a suitable test rig including well constructed jigs for properly applying testloads as well as supporting the device under test. The important coupling points for load application are realized via flexible connections, mainly using radial and thrust spherical rod ends. The realization of such mechanical links including its joint elements are therefore of special importance for ensuring a high quality with respect to defined load application and test reproducibility.

In this work radial and thrust spherical rod ends are analysed for its applicability in fatigue test rigs, including investigations of the main bearing characteristics. In the first part of this thesis the requirements and conditions for spherical bearings in fatigue test applications have been identified in order to design and realize a special test rig for investigating the performance of certain spherical bearings under realistic test loads as found in fatigue test applications. The realized test rig is able to measure friction and bearing clearances for thrust and radial rod ends under defined static and dynamic loads. Furthermore high cycle test loads can be applied to the tested bearings enabling the determination of changes in the bearing properties over its life cycle. With this test rig different types of spherical bearings from different manufacturers have been characterized and dynamically tested. Particular attention was paid to the characteristics of the bearings in high load cycle experiments for gaining important insights into the properties for flexible joints in fatigue tests with up to 12 million load cycles.

Based on the obtained results in the last part of the work the applicability of certain spherical bearing types has been discussed for the identified requirements in fatigue test applications. The conducted research on joint bearing elements can help the test engineers in testing facilities to increase the attainable quality and reproduceability of fatigue tests together with ensuring the reliability and durability of the used test rig equipment.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Motivation und Aufgabenstellung	3
2.1	Motivation	3
2.2	Aufgabenstellung	4
2.3	Vorgehensweise	5
3	Einsatz von Gelenklagern bei Ermüdungsversuchen	6
3.1	Ermüdungsversuche	6
3.2	Definieren von Störeinflüssen während Ermüdungsversuche	9
3.3	Vorgehensweise bei der Charakterisierung	9
3.4	Schwenk- und Kippwinkel während einer Prüfung am Beispiel Drehgestell- Rahmen	10
3.5	Einfluss der Reibung bei einem Ermüdungsversuch	14
4	Allgemeines über Gelenklager	16
4.1	Arten von Lager bei Ermüdungsversuchen im Betrachtungsgebiet	16
4.2	Auffistung verwendeter Lager	19
4.3	Allgemeines über Gelenklager mit sphärischen Flächen	19
4.4	Axialgelenklager	21
4.5	Radialgelenkköpfe	21
4.6	Wartungsfreie Gelenklager	22
4.7	Wartungspflichtige Gelenklager	24
5	Prüfstand zur Ermittlung von Reibung und Lagerspiel bei Gelenklagern	25
5.1	Anforderungen	25
5.2	Konstruktion	27
5.3	Charakterisierung der verwendeten Festkörpergelenke	38
5.4	Verwendete Messtechnik am Prüfstand	45
5.5	Prüfstandskalibrierung	51
5.6	Verifikation des Prüfstands	53
6	Charakterisierung von Gelenklagern	55
6.1	Prüflinge	55
6.2	Prüfprogramm zur Charakterisierung von Gelenklagern	58
6.3	Auswertung einer Versuchsserie	59

6.4	Ergebnisse	62
6.5	Zusammenfassung der Lager-Charakterisierung	81
7	Lebensdaueruntersuchungen an Gelenklagern	82
7.1	Lebensdauerbetrachtung für wartungsfreie Gelenklager	82
7.2	Lebensdauerbetrachtung für wartungspflichtige Gelenklager	86
7.3	Ausblick auf weiterführende Lebensdaueruntersuchungen	87
7.4	Möglichkeiten zur Verlängerung der Lebensdauer	88
8	Zusammenfassung und Ausblick	90
8.1	Zusammenfassung	90
	Literaturverzeichnis	92

Kapitel 1

Einleitung

Die Fragestellung der Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit von mechanischen Bauteilen und Strukturen lässt sich entweder rechentechnisch in Form von FE-Simulationen und anschließenden Festigkeitsrechnungen, oder durch sogenannte Festigkeits- bzw. Ermüdungsversuche auf experimentellem Wege klären. In beiden Fällen bedarf es jedoch der genauen Kenntnisse der auftretenden Betriebslasten und Sonderlasten über die prognostizierte Lebensdauer des betreffenden Bauteils (Lastannahmen). Will man zusätzlich zu der rechentechnischen Auslegung eines Bauteils die dafür durchgeführten Simulationen und Rechnungen verifizieren, so kann das wiederum nur mit experimentellen Nachweisen in Form von Festigkeitsversuchen erfolgen. Der Ermüdungsversuch hat demgemäß eine zentral wichtige Bedeutung bei der Auslegung sicherheitsrelevanter oder für die jeweilige Funktion besonders wichtiger Bauteile und ist in vielen Fällen im Zuge des Zulassungsprozesses - wie etwa bei Schienenfahrzeugen - gefordert (siehe Nachweisführung lt. EN 13749).

Festigkeitsprüfungen werden meist in einem dafür geeigneten Prüfinstitut durchgeführt, wie beispielsweise in der Schwingprüfhalle der TU Graz.

Die statisch und dynamischen Belastungen bei solchen Versuchen werden bei größeren Bauteilen meistens durch servo-hydraulische Prüfzylinder aufgebracht. Betrachtet man die hohen Anforderungen an derartige Prüfstände zur definierten Belastung entsprechend der gesamten Lebensdauer der mechanischen Bauteile, so können diese Anforderungen nur dann ausreichend erfüllt werden, wenn die entsprechenden Prüfstände hinsichtlich der folgenden Problemstellungen akzeptable Eigenschaften aufweisen:

Auf mechanischer Seite sollten die folgenden Einflüsse betrachtet werden:

- Berücksichtigung der Massen bei bewegten Teilen (Vorrichtungen und Prüfling)
- Prüfstandsgeometrie - Verformungen und Bewegungen des Prüflings und/oder der Vorrichtung während einer Prüfung ergeben möglicherweise Richtungsänderungen der Kräfte.
- Nicht ideales Ein- und Ausleiten von Kräften durch den Einsatz von Gelenklagern
- Änderung von mechanischen Eigenschaften des Prüflings während einer Prüfung (wie zum Beispiel Ermüdung des Prüflings, Temperaturänderungen, ...)

Aus regelungstechnischer Sicht treten die folgenden Problemstellungen auf:

- Nichtlinearitäten (beispielsweise bei Gummielementen im Prüfaufbau)
- Totzeiten (beispielsweise bei spielbehafteten Gelenklagern)
- Zeitvarianz (Alterung von Prüfstands- bzw. Prüflingskomponenten, z.B. Lager, Gummiteile, etc.)

Die in dieser Diplomarbeit behandelte Problematik ist das nicht ideale Ein- und Ausleiten von Kräften bei Ermüdungsversuchen durch den Einsatz von Gelenklagern.

Diese Gelenklager unterliegen während der Versuche hohen Ermüdungsbelastungen, sollten sich jedoch über die Versuchszeit hinweg in all ihren Eigenschaften möglichst ideal verhalten und nicht verändern.

Alle realen Gelenke haben jedoch parasitäre Einflüsse wie Reibung und Lagerspiel, die eine Prüfung maßgeblich beeinflussen können. Um eine möglichst realitätsnahe Ermüdungsprüfung durchführen zu können, müssen diese Einflüsse berücksichtigt werden. Wenn eine entsprechende Reduktion dieser Störgrößen im Vorhinein nicht schon durch geeignete Ausführung des Prüfstandes möglich ist, müssen diese ermittelt und nachträglich rechnerisch mit einbezogen werden.

Kapitel 2

Motivation und Aufgabenstellung

2.1 Motivation

Sämtliche in Ermüdungsversuchen eingesetzten Gelenke bewirken auf die Prüfung parasitäre Einflüsse wie Reibung und Lagerspiel. Diese Einflüsse nehmen maßgebend Einfluss auf die Qualität einer durchgeführten Prüfung und können im schlimmsten Fall die in den Prüfling ein- bzw. ausgeleiteten Kräfte unzulässig stark verfälschen, so dass die gesamte Prüfung durch falsche Belastung des Prüflings ungültig wird.

Dementsprechend ist es für eine qualitativ hochwertige Prüfung notwendig, gelenkige Anbindungen im Prüfstand möglichst ideal auszuführen, unter besonderem Bedacht der möglichen parasitären Einflussfaktoren der gewählten Gelenke und Vorrichtungsgemeintrien. Es ist daher notwendig, ein genaues Kenntnis der Eigenschaften der verwendeten Gelenklager zu besitzen, um für jegliche Versuche die geforderte Prüfqualität garantieren zu können.

Von den Herstellern der Gelenklager werden allerdings für die speziellen Anforderungen bei Ermüdungsversuchen nur unzureichende Informationen zur Verfügung gestellt.

Der Reibwert derartiger Gelenke wird beispielsweise mit 0,02 bis 0,2 spezifiziert, die damit erreichbaren Gelenkeigenschaften hinsichtlich parasitärer Querkräfte reichen dann von akzeptabel bis absolut unzulässig.

Es bleibt somit also nur eine experimentelle Untersuchung der tatsächlichen relevanten Eigenschaften der eingesetzten Gelenke, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wird.

Führt man beispielsweise eine Lagerberechnung laut ISO 281 für wartungsfreie Radialgelenklager mit den dafür typischen Belastungen während Ermüdungsversuchen durch, so erhält man eine rechnerische Lebensdauer des Lagers von 1,5 Milliarden Lastwechseln (Kapitel 7.1.1). Aus verschiedensten Gründen, auf die im Zuge dieser Arbeit eingegangen wird, sind die zur Berechnung getroffenen Annahmen jedoch in der Realität keinesfalls zutreffend. Je nach Anwendungsfall verändern die Lager nach bereits kurzer Einsatzzeit ihre Eigenschaften erheblich. Dies kann so stark sein, dass es zum Bruch des Lagerkopfes kommt.

Exemplarisch ist solch ein Fall in Abbildung 2.1 dargestellt. Dieses Lager wurde in einem

Ermüdungsversuch falsch eingesetzt und seine Gleitflächen begannen nach nur wenigen tausend Lastzyklen zu „fressen“. Das bedeutet, es traten Mikroschweißungen an den Gleitflächen auf, welche durch die Lagerbewegung im gleichen Lastzyklus wieder losgerissen wurden. Dies führte zu einem dramatischen Anstieg der integralen Lagerreibung und schlussendlich zum Bruch.



Abbildung 2.1: Bruch eines Radialgelenkkopfes bei nicht bestimmungsgemätem Einsatz in einem Ermüdungsversuch.

Da es keine genauen Kenntnisse der jeweiligen Lagereigenschaften und auch keine passende Berechnungsvorschrift zur Auslegung dieser Lager für die Verwendung bei Ermüdungsversuchen gibt, müssen die relevanten Lagereigenschaften versuchstechnisch ermittelt werden. Die dabei gewonnenen Kenntnisse zur Verwendung von Gelenklagern können bei entsprechender Berücksichtigung im Prüfstandskonzept die gesamte Prüfqualität sicherstellen oder sogar steigern.

2.2 Aufgabenstellung

Im Zuge der Durchführung dieser Arbeit sollen die Einsatzbedingungen und Anforderungen von Gelenklager in Ermüdungsversuchen analysiert werden.

Abgeleitet aus den Ergebnissen dieser Analyse soll ein Anforderungsprofil für einen Prüfstand zur Untersuchung von Gelenklagereigenschaften erstellt werden. Aus dem damit ermittelten Anforderungsprofil soll ein entsprechender Prüfstand realisiert werden, mit welchem alle gängigen Gelenklagertypen untersucht werden können.

Mit diesem Prüfstand soll eine Charakterisierung unterschiedlicher, in Ermüdungsversuchen zum Einsatz kommender Gelenklager, mit für den Einsatz in Ermüdungsversuchen typischen statischen und dynamischen Belastungen durchgeführt werden.

Abschließend sollen die dabei gewonnenen Erkenntnisse diskutiert und dahingehend interpretiert werden, um geeignete Maßnahmen zum richtigen Einsatz von Gelenklagern in Ermüdungsversuchen treffen zu können.

2.3 Vorgehensweise

Zu Beginn dieser Diplomarbeit wurde eine Literaturrecherche über den Aufbau und die Eigenschaften sphärischer Gleitlager und deren Alternativen durchgeführt.

In der Prüfstandstechnik eingesetzte Axialgelenklager und Radialgelenkköpfe wurden hinsichtlich ihrer Eignung im Einsatz bei Ermüdungsversuchen untersucht. Hierfür werden am Beispiel einer Festigkeitsprüfung an einem Drehgestell-Rahmen zunächst die Anforderungen und Einsatzbedingungen von Gelenklagern analysiert.

Basierend auf den dabei erhaltenen Anforderungen wurde ein spezieller Prüfstand konzipiert und realisiert, um die bei Ermüdungsversuchen eingesetzten Gelenklager zu charakterisieren und hinsichtlich der Lebensdauer abhängig von möglichen Prüfbelastungen zu untersuchen. Hierbei wurde der Reibwert für Axialgelenklager und Radialgelenkköpfe unterschiedlicher Typen, Baugrößen und Hersteller, für unterschiedliche statische und dynamische Belastungen ermittelt und verglichen.

Abgeleitet aus den erhaltenen Ergebnissen werden im letzten Teil der Arbeit Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensdauer von Gelenklagern im Prüfstandsbetrieb vorgeschlagen. Weiters wurde eine Einsatzmatrix zum korrekten Einsatz von unterschiedlichen Gelenklagertypen für verschiedene Prüfbedingungen verfasst.

Kapitel 3

Einsatz von Gelenklagern bei Ermüdungsversuchen

Um ein besseres Verständnis zu bekommen, womit die bei Ermüdungsversuchen eingesetzten Lager konfrontiert werden, wird zuerst ein Ermüdungsversuch beschrieben. Danach werden die bekannten Störeinflüsse durch Gelenklager beim Einsatz in derartigen Prüfungen aufgelistet. Anhand von Messungen an einer realen Drehgestell-Rahmen-Prüfung in der Schwingprüfhalle wurden die realen Einsatzbedingungen näher untersucht und für die eingesetzten Lager charakterisiert. Im Speziellen wurden dabei Belastungen und Bewegungsumfang aller Gelenke analysiert.

3.1 Ermüdungsversuche

Der folgende Abschnitt 3.1 soll als Einleitung in die Prüfstandstechnik für Ermüdungsversuche dienen und einen Überblick über dieses Gebiet verleihen. Im Speziellen sind Ermüdungsversuche für die Untersuchung mechanisch beanspruchter Bauteile auf Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit gemeint.

Diese Prüfungen werden im Allgemeinen mit servo-hydraulischen Prüfzylindern über eine hohe Anzahl von Lastwechseln durchgeführt (Lastwechsel bis zu 12 Millionen). Mittels servo-hydraulischer Prüfzylinder können wohl-definierte Kraft- oder Weg-Sollwertsignale in einen Prüfling eingebracht werden. Um ein spezielles Belastungsszenario in einen Prüfling einzubringen, werden jedoch nicht nur Prüfzylinder und deren Anbauteile benötigt, ebenso wichtig für eine realitätsnahe Prüfung sind Reaktionskraftabstützungen inklusive Anbauteile und eine Regelanlage. Für die Reaktionskraftabstützungen werden wie schon bei den Prüfzylindern Gelenklager verwendet. In Abbildung 3.1 ist beispielhaft ein Prüfaufbau für eine Drehgestell-Rahmen-Prüfung dargestellt.

Für die Realisierung des dargestellten Prüfstandes wurden 13 servo-hydraulische Prüfzylinder verwendet. Die Anbindung dieser Zylinder, sowie die Anbindung der Reaktionskraftstützen wird über Radialgelenkköpfe, Axialgelenklager und biegeeweiche Gelenke gemacht. Wie in diesem Bild ersichtlich, ist eine große Anzahl von Vorrichtungsteilen für solch eine Prüfung vonnöten. Diese Anzahl an Vorrichtungsteilen ist jedoch nötig, um einerseits zu gewährleisten, dass keine Verformungen der Abstützungen während des Prüflaufes auftreten und andererseits, um alle Freiheitsgrade laut Spezifikation exakt zu definieren. Für die in Abbildung 3.1 dargestellte Drehgestell-Rahmen-Prüfung ist beispielhaft in Abbildung 3.2 eine Kräfteskitze laut Spezifikation dargestellt.

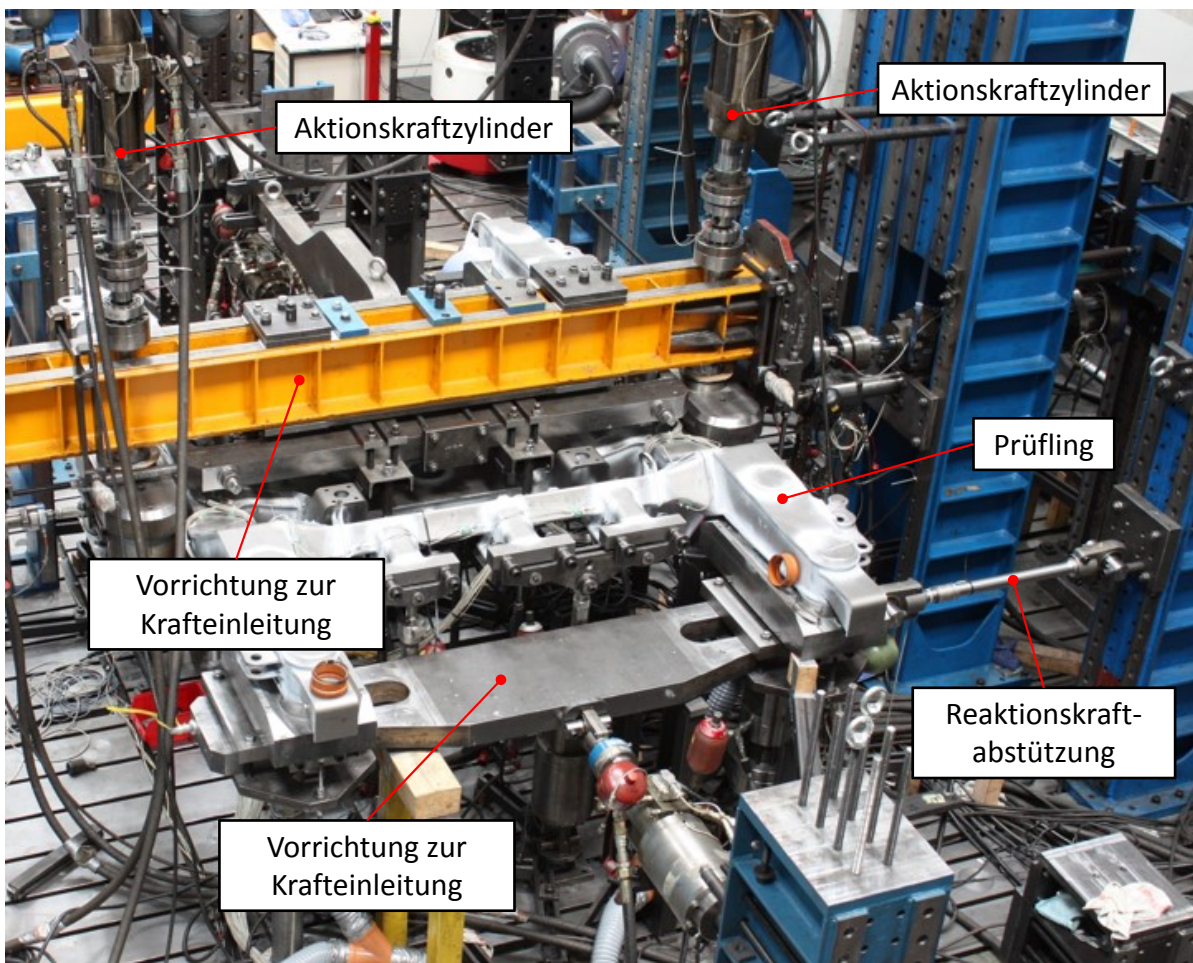


Abbildung 3.1: Prüfaufbau für eine Drehgestell-Rahmen-Prüfung.

3.1.1 Aufgaben des Prüfaufbaues bei Ermüdungsversuchen

Oberste Priorität der Aufgaben des Prüfaufbaues hat die Sicherstellung der Prüfqualität über die gesamte Prüfdauer. Bei Ermüdungsversuchen kann diese Prüfdauer bis zu 12 Millionen Lastwechsel sein.

Für die Krafteinleitung mittels der Prüfzylinder ist es notwendig zu gewährleisten, dass zu jedem Zeitpunkt, jeder Prüfzylinder die richtige Lastamplitude mit der richtigen Lastrichtung und der richtigen zeitlichen Relation (Phase) besitzt. Die Prüfsignalvorgaben für jedes Belastungsszenario werden im Regelsystem durch digitale Kraft- oder Wegregelung der Prüfzylinder erreicht. Zur Regelung ist auf jedem Prüfzylinder ein Kraft- und ein Wegsensor verbaut.

Nicht weniger wichtig, wie die zuvor erwähnten Aufgaben, ist das exakte Definieren aller Freiheitsgrade. Hierbei ist einerseits wichtig, dass all jene Freiheitsgrade frei bleiben, welche eine Bewegung vollführen müssen, andererseits müssen alle restlichen Freiheitsgrade zu 100 Prozent gesperrt werden. Zur Darstellung der Komplexität dieser Aufgabe ist in Abbildung 3.2 eine Kräfteskizze aus der Spezifikation einer Drehgestell-Rahmen-Prüfung abgebildet.

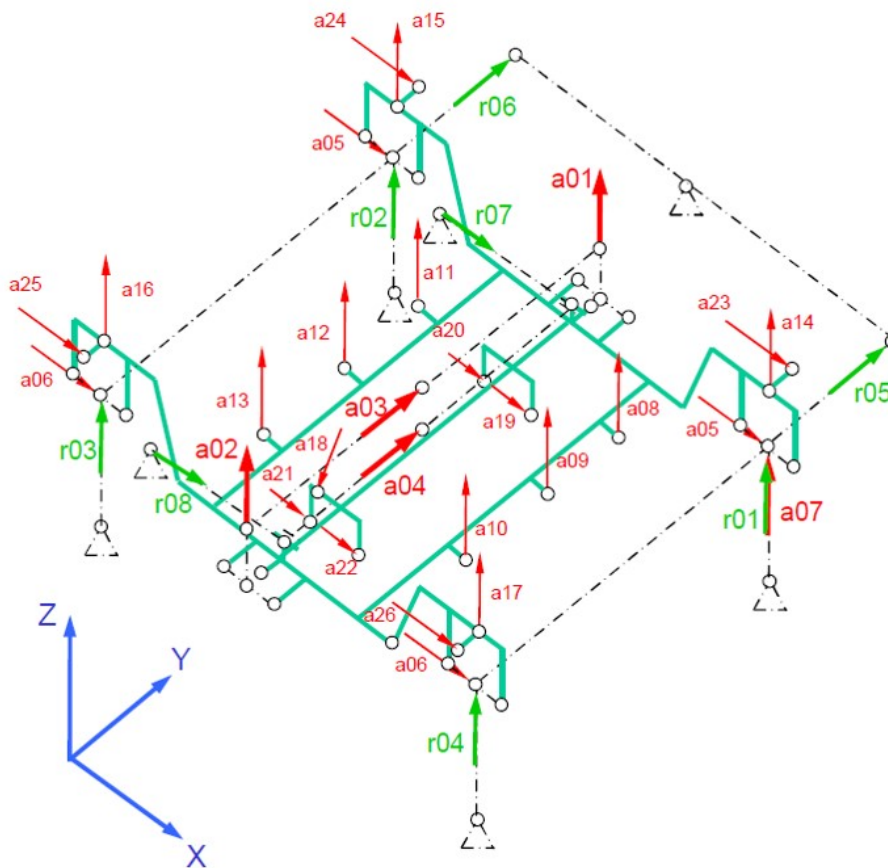


Abbildung 3.2: Kräfteskizze für eine Drehgestell-Rahmen-Prüfung laut Spezifikation.

3.2 Definieren von Störeinflüssen während Ermüdungsversuche

Störeinflüsse sind all jene Parameter, welche eine Prüfung beeinflussen können und im schlimmsten Fall eine Prüfung soweit beeinflussen, dass sie als nicht gültig angesehen werden kann.

Durch die Verwendung von Gelenklager können Störeinflüsse wie Reibung, Querkräfte oder auch Lagerspiel auftreten.

- **Reibung:** Der erste Einfluss, der behandelt wird, ist die Reibung an den Berührstellen der Gelenklager. Axialgelenklager und Radialgelenklager besitzen Reibung. Durch eine nicht beziehungsgemäße Verwendung (oder durch zu hohe Lasten/Lastwechselzahlen solcher Lager) können sehr hohe Reibwerte entstehen. Dies hat zur Folge, dass Prüflinge, unter Umständen, nicht richtig geprüft werden. Zum einen, weil durch Reibung in den jeweiligen Anbindungen Kräfte verändert werden, zum anderen, weil dadurch ein Reibmoment entsteht, das möglicherweise zu einer falschen Messung durch das Messequipment, durch beispielsweise unzulässig hohe Querkräfte bei Kraftsensoren, führt. Im schlimmsten Fall kann es, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, zum Bruch von Vorrichtungsteilen, Messequipment oder dem Prüfling führen.
- **Lagerspiel:** Dieser Einfluss tritt bei Radialgelenkköpfen auf und führt bei dynamischen Versuchen mit wechselnden Lasten zu Totzeiten im Regelsystem der Prüfzylinder. Diese Totzeiten führen zu Kraftstößen auf den Prüfling, welche die Regelung nicht ausgleichen kann.
- **Querkraft:** Durch die Verwendung von Festkörpergelenken und dem Auftreten von Reibung in Gelenklagern werden zwangsläufig während der Auslenkung eines Prüflings Querkräfte in diesen eingeleitet. Dies kann nicht verhindert werden und muss - sofern nicht vernachlässigbar - in einem Ermüdungsversuch bedacht sein.

3.3 Vorgehensweise bei der Charakterisierung

Die Herangehensweise für die Ermittlung typischer Belastungen auf Gelenklager während eines Ermüdungsversuches sah wie folgt aus. Im ersten Schritt wurden die verwendeten Gelenke aufgenommen und ihrer jeweiligen Position zugeordnet. Dann wurden die Belastungsarten (schwellend, wechselnd) den Gelenken zugeordnet. Im nächsten Schritt wurde die maximale Last für die Gelenke ermittelt. Hierzu wurde zwischen Aktionskräften und Reaktionskräften unterschieden. Für die Belastung der Gelenke an Aktionskräften wurden die gemessenen Kräfte des jeweiligen Prüfzylinders herangezogen. Die Belastungen der Gelenke an Reaktionskräften wurden mittels einer Kräftebilanz errechnet und mit den gemessenen Kräften der Abstützungen verglichen. Zum Schluss wurden

die Bewegungen der einzelnen Gelenklager mittels Distanzmessungen eruiert. Dies ist in Kapitel 3.4 näher erklärt. In Tabelle 3.1 sind alle Belastungen, Belastungsarten und Bewegungen für das Beispiel Drehgestell-Rahmen-Prüfung in der Schwingprüfhalle jedem Gelenklager zugeordnet.

3.4 Schwenk- und Kippwinkel während einer Prüfung am Beispiel Drehgestell-Rahmen

Um die Kipp- und Schwenkbewegungen der verwendeten Lager zu ermitteln, wurde mittels berührungslos messenden laseroptischen Triangulationssensoren der Bewegungsumfang von definierten Punkten des Drehgestell-Rahmen gemessen. Die Messungen wurden während der 4. Laststufe durchgeführt. Im Folgenden wird die Vorgehensweise anhand einer Messung beschrieben.

Hierfür wird die Messung Nr.: 6 herangezogen. In den Abbildungen 3.3 und Abbildung 3.4 ist die Position dieser Messung ersichtlich.

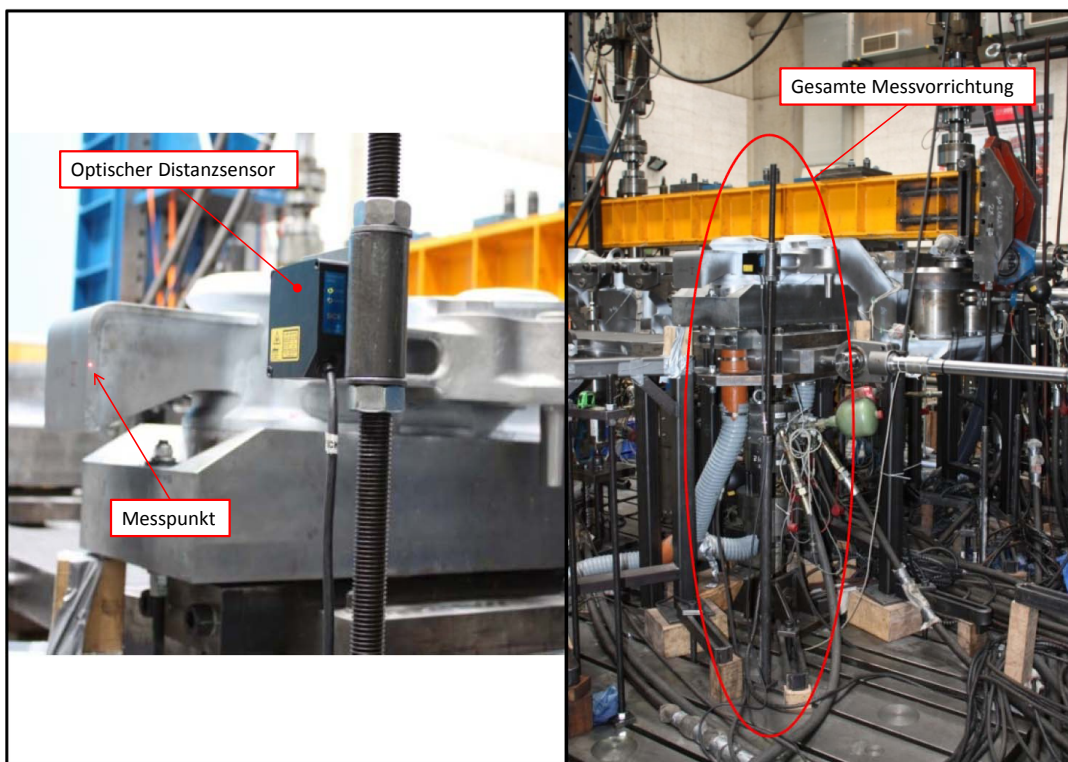


Abbildung 3.3: Verschiebungsmessung an definierter Stelle am Prüfling

Die Messungen wurden mittels eines optischen Distanzensors der Type: *Displacement sensor OD Precision (OD5-350W100) Fa. Sick GmbH*, mit den folgenden Kennwerten durchgeführt [8]:

- Arbeitsbereich: 350 ± 100 mm
- Auflösung: $5 \mu\text{m}$
- Reproduzierbarkeit: $15 \mu\text{m}$
- Linearität: $\pm 160 \mu\text{m}$

Der Messschrieb für die durchgeführte Messung ist in Abbildung 3.5 ersichtlich. Die Messung ergibt für die reale Prüfsequenz am Bauteil eine maximale Verschiebung des Punktes von $\Delta s_6 \pm 4,5$ mm.

Aus diesen Einzelmessungen des Verschiebeweges wurde die Berechnung aller Schwenk- und Kippwinkel mit Verwendung von Winkelfunktionen vereinfacht durchgeführt (Abschätzung des Bewegungsumfanges). Die Drehachsenabstände der Gelenklager für die Berechnung sind aus einer CAD Zeichnung des Prüfstands entnommen. Der Drehachsenabstand, welcher für die Messung Nr.:6 relevant ist, ist in Abbildung 3.4 ersichtlich und beläuft sich auf, $l_{6,Abst} = 1207$ mm. In Abbildung 3.5 ist eine durchschnittliche Wegamplitude von $\Delta s_6 = \pm 4,5$ mm ersichtlich. Das ergibt eine absolute Verschiebung des Messpunktes Nr.:6 von $s_6 = 9$ mm.

Der Kippwinkel ψ_6 ergibt sich damit zu:

$$\psi_6 = \arcsin\left(\frac{s_6}{l_{6,Abst}}\right), \quad (3.1)$$

Setzt man nun in Formel 3.1 für $\Delta s_6 = 9$ mm und für $l_{6,Abst} = 1207$ mm ein, so erhält man einen Kippwinkel ψ_6 um die y-Achse von:

$$\psi_6 = 0,44^\circ$$

Das Ergebnis aller Messungen für alle im Prüfstand eingesetzten Lager ist in Tabelle 3.1 ersichtlich und zeigt, dass sämtliche Winkel aller Gelenklager im real untersuchten Prüfversuch kleiner $\psi_{max} = 0,5^\circ$ sind.

In Tabelle 3.1 sind alle verwendeten Gelenke mit Belastungsart, Normalkraft, Schwenkwinkel und Kippwinkel zusammengefasst. Eine genauere Aufstellung, welche Lagerbezeichnung welchem Lagertyp zugeordnet wird, befindet sich im Abkürzungsverzeichnis. Die Gelenknamen geben dabei keine Information über den Hersteller. Jeder Hersteller verwendet abweichende Bezeichnungen. Im Zuge dieser Arbeit werden für alle Gelenke die Bezeichnungen eines Herstellers verwendet. Jedoch muss das Lager dementsprechend nicht von diesem sein. Weiters ist anzumerken, dass die Lager in drei Gruppen eingeteilt wurden, Radialgelenkköpfe, Radialgelenklager und Axialgelenklager. In weiterer Folge werden aber nur noch die Gruppen Radialgelenkköpfe und Axialgelenkköpfe betrachtet. Zum Ersten, weil dies die meist verwendeten Lager sind und zum anderen, weil Radialgelenkköpfe aus Radialgelenklager und Gelenkkopf, in denen das Lager eingepresst wird, besteht.

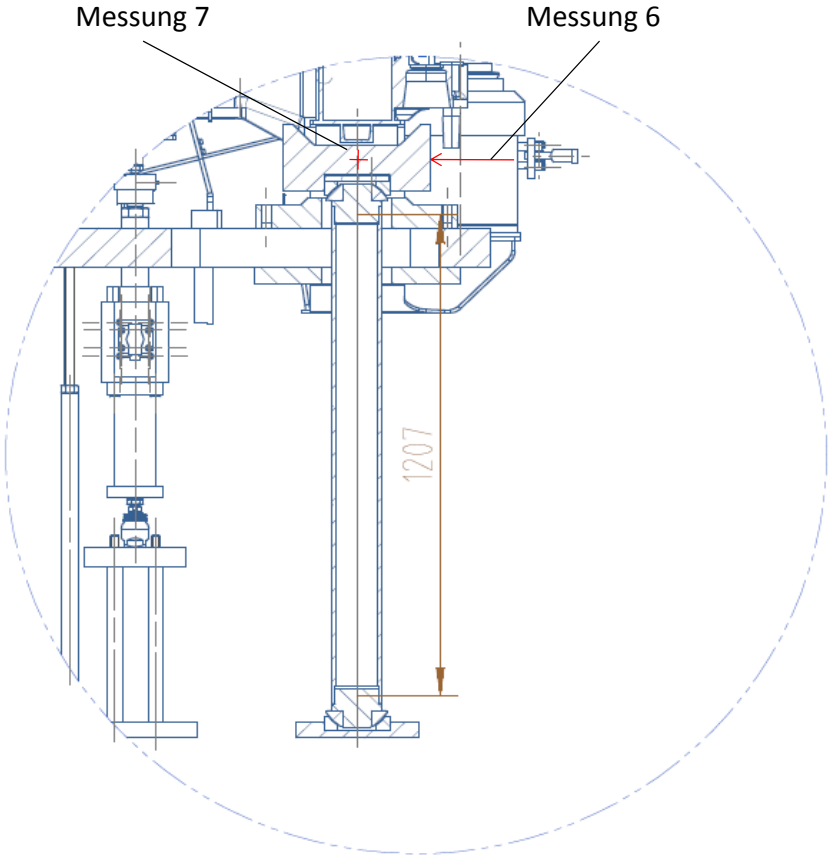


Abbildung 3.4: 2D Skizze der Messstelle Nr.: 6 und Nr.: 7 an der Vertikalstütze

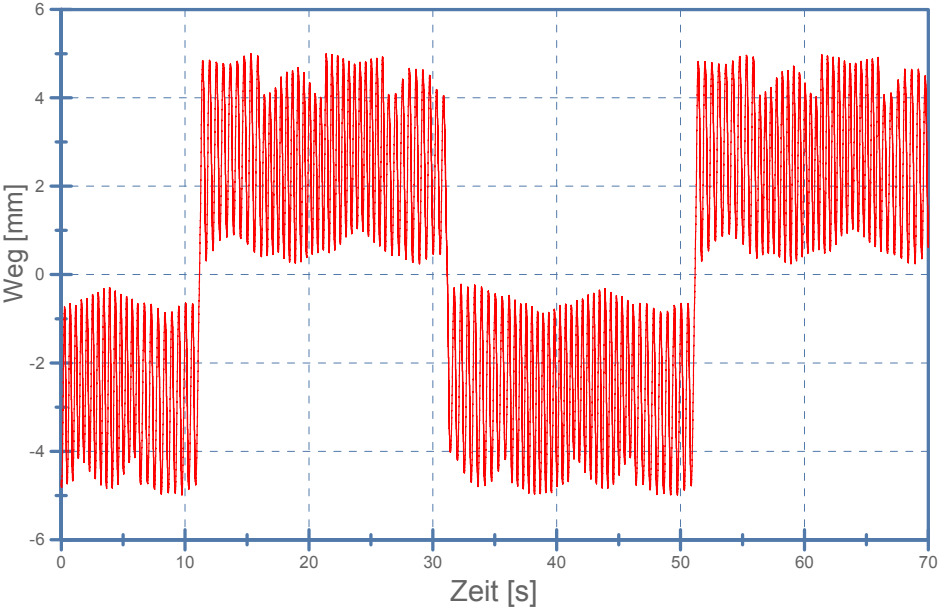


Abbildung 3.5: Verschiebungsmessung am Punkt Nr.:6 mittels eines optischen Triangulationssensors.

Charakterisierungstabelle						
	Gelenkname	Belastungsart	Kraft F		Schwenkwinkel ϕ	Kippwinkel ψ
			Max	Min		
Radialgelenkköpfe	GIR 25 UK	wechselnd	9,6 kN	-9,6 kN	0,13°	0,11°
	GAR 40 UK 2RS	wechselnd	15,7 kN	-15,7 kN	0,16°	0,16°
	GAR 45 UK 2RS	wechselnd	31,4 kN	-31,4 kN	0,13°	0,13°
	GIHR-K 60 DO	wechselnd	88,9 kN	-88,9 kN	0,02°	0,03°
	GIHR-K 60 DO	wechselnd	43,2 kN	-43,2 kN	0,02°	0,05°
	GIHR-K 60 DO	wechselnd	31,4 kN	-31,4 kN	0,13°	0,13°
	GIHR-K 80 DO	wechselnd	48,5 kN	-48,5 kN	0,06°	0,48°
	GIR 80 DO 2RS	schwellend	-35 kN	-146 kN	0,44°	0,06°
	GE 120	wechselnd	88,9 kN	-88,9 kN	0,02°	0,03°
	GEZ 260	schwellend	-96,3 kN	-188,2 kN	0,15°	0,05°
Radialgelenklager	GE 40 UK 2RS	wechselnd	15,7 kN	-15,7 kN	0°	-
	GE 100 ES	wechselnd	80 kN	-80 kN	-	-
Axialgelenklager	GE 30 AW	schwellend	0 kN	-40 kN	-	-
	GE 40 AW	schwellend	0 kN	-88,9 kN	-	-
	GE 70 AW	schwellend	-35 kN	-146 kN	0,44°	0,06°
	GE 70 AW	schwellend	-35 kN	-146 kN	0,44°	0,06°
	GE 100 AW	schwellend	-96,3 kN	-188,2 kN	0,15°	0,05°

Tabelle 3.1: Charakterisierungstabelle für die Beanspruchung zur von Gelenken untersuchten Drehgestell-Rahmen-Prüfung

3.5 Einfluss der Reibung bei einem Ermüdungsversuch

Für die vereinfachte Untersuchung des Reibungseinflusses bei einem Ermüdungsversuch wird eine Drehgestell-Rahmen-Prüfung am Institut für Leichtbau herangezogen (siehe auch Abschnitt 3.1).

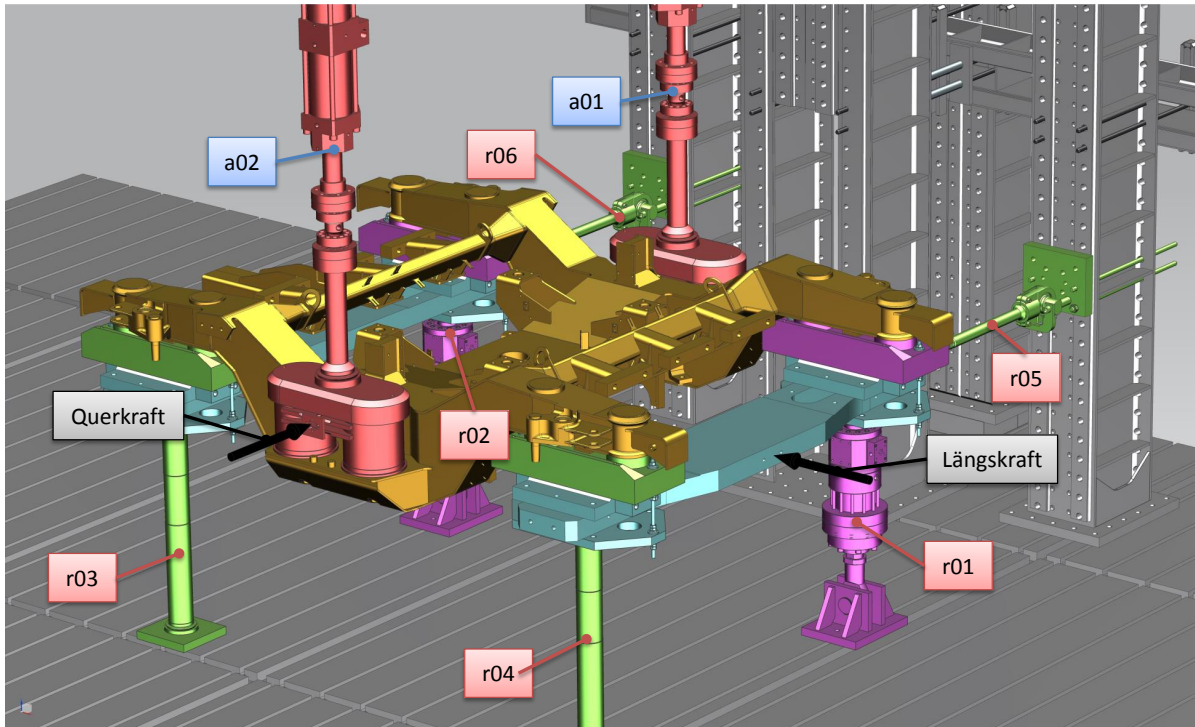


Abbildung 3.6: Vereinfachte Darstellung einzelner Kräfte und Abstützungen bei einer Drehgestell-Rahmen-Prüfung.

Abbildung 3.6 stellt diese vereinfachte Drehgestell-Rahmen-Prüfung dar. $a01$ und $a02$ sind die Bezeichnungen für die durch zwei vertikal angebrachte Prüfsäulen aufgebrachte Aktionskraft, welche mit einer Druckkraft von je $F_V = 188,2 \text{ kN}$ den Drehgestellrahmen belasten. Die Reaktionskräfte $r01$ bis $r04$ stützen die Vertikalbelastung, $r05$ und $r06$ stützen die Querbewegung ab. Das bedeutet, dass die Stützen $r01$ bis $r04$ eine Vertikalkraft von je $F_{rV} = 94,1 \text{ kN}$ aufnehmen. Die Querkraft F_Q wird durch drei Prüfsäulen aufgebracht. Zur Vereinfachung ist in Abbildung 3.6 nur eine resultierende Kraft eingezeichnet. Im Versuch ergibt sich dafür eine maximale Kraftamplitude von, $F_Q = 97 \text{ kN}$. Das bedeutet, dass die Reaktionskraftabstützungen $r05$ und $r06$ eine Reaktionskraft von je $F_{rQ} = 48,5 \text{ kN}$ aufweisen.

Die eingezeichnete Längskraft F_L soll als jene Kraft angesehen werden, welche notwendig ist, um eine Bewegung in Längsrichtung anzuregen (keine aktive Längskraft durch Prüfsäulen eingeleitet).

Das Reibmoment M_R errechnet sich aus der Normalkraft F_N , dem Reibwert μ und dem Kugeldurchmesser d_K zu:

$$M_R = F_N \cdot \mu \cdot \frac{d_K}{2}, \quad (3.2)$$

Die Längskraft F_L erreicht sich mit dem Reibmoment M_R und dem Drehachsenabstand s_{Abst} zu:

$$F_L = \frac{M_R}{s_{Abst}} \quad (3.3)$$

Bei einem angenommenen Reibwert von $\mu = 0,2$, welcher laut Lagerhersteller zulässig und möglich ist, ergeben sich, die in Tabelle 3.2 dargestellten Reibmomente und Längskräfte.

	Normalkraft F_N in [kN]	Gelenklager Prüflingsseite	Gelenklager Abstützungsseite	Reibmoment M_R in [Nm]	Längskraft F_L in [kN]
a01	-188,2	GE100 AW	GEZ 260	10730	4,3
a02	-188,2	GE100 AW	GEZ 260	10730	4,3
r01	-94,1	GIR80DO 2RS	GE70 AW	2590	2,16
r02	-94,1	GIR80DO 2RS	GE70 AW	2590	2,16
r03	-94,1	GE70 AW	GE70 AW	3200	2,67
r04	-94,1	GE70 AW	GE70 AW	3200	2,67
r05	-48,5	GIHR-K80 DO	GIHR-K80 DO	1020	0,95
r06	-48,5	GIHR-K80 DO	GIHR-K80 DO	1020	0,95
Summe					20,16 kN

Tabelle 3.2: Tabelle zur Darstellung der Reibmomente und der Längskräfte bei einem $\mu = 0,2$

Das bedeutet, dass bei einem Reibwert von $\mu = 0,2$ eine Längskraft von $F_L = 20,16$ kN durch Lagerreibung verloren geht.

Bei einer möglichen Aktionskraft in Form einer Längskraft von $F_L = 170$ kN würde das einen Fehler von 12% bedeuten.

Eine derartige Verfälschung der eingeleiteten (und spezifizierten) Kräfte ist jedoch in jedem Fall inakzeptabel und verhindert eine realitätsnahe und spezifikationskonforme Prüfung.

Eine akzeptable Fehlerquote wäre kleiner als 3%. Dies würde bedeuten, dass für diesen Versuch die beteiligten Gelenklager einen Reibwert von $\mu < 0,05$ aufweisen.

Kapitel 4

Allgemeines über Gelenklager

Im folgenden Kapitel werden verschiedene Arten von Gelenklager, die bei Ermüdungsversuchen im Prüfstandsbaue eingesetzt werden, aufgelistet und beschrieben. Weiters wird eine Auflistung der verwendeten Gelenklager und deren Hersteller vorgenommen, sowie deren vom Hersteller angegebenen Eigenschaften aufgelistet.

4.1 Arten von Lager bei Ermüdungsversuchen im Betrachtungsgebiet

Im folgenden Abschnitt werden nur Lager betrachtet, welche für den Betrieb bei Ermüdungsversuchen sinngemäß eingesetzt werden können. Darunter fallen fast ausschließlich Gleitlager.

4.1.1 Wartungsfreie Lager

Bei diesem Lagertyp wird mittels einer Beschichtung auf einer der beiden Gleitflächen eine Schmierung erzeugt (Feststoff-Schmierung).

Radialgelenklager/Schräggelenklager/Axialgelenklager

In der folgenden Aufzählung werden verschiedene Lagerhersteller dieser Gelenklager angeführt. Diese Hersteller haben zum Teil unterschiedliche Fertigungsgenauigkeiten bei der Lagerherstellung, somit ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften für die unterschiedlichen Lagertypen. Jedoch gibt es auch einige Hersteller, deren Lager sich durch Qualität und Genauigkeit kaum unterscheiden.

- INA/FAG, Fluro, LS, Askubal, SKF, Durbal, Nadella, DEVA Gelenklager, DGT, Hirschmann sphericalbearings, WSW Wälzlager, mbo, Minebea, TKK

4.1.2 Wartungspflichtige Lager

Mit Fett geschmierte Lager sind in Bauform und Abmaß fast ident mit den Feststoff geschmierten Lagern. Der größte Unterschied zu den wartungsfreien Lagertypen ist die fehlende Beschichtung sowie das Vorhandensein einer Schmiernut für das Einbringen von Fett in die Gleitzone. Lagertypen und eine Liste mit Herstellern für Lager bei Ermüdungsversuchen sind:

Radialgelenklager/Schräggelenklager/Axialgelenklager

- INA/FAG, Fluro, LS, Askubal, SKF, Durbal, Nadella, DEVA Gelenklager, DGT, Hirschmann sphericalbearings, WSW Wälzlager, mbo, Minebea, TKK

4.1.3 Hydrodynamisch geschmierte Lager

Hydrodynamische Lager zeichnen sich durch ihre besonders guten Eigenschaften bei Reibwerten (nahezu null) aus. Sie benötigen jedoch sehr hohe Relativgeschwindigkeiten der Gleitflächen zueinander, dadurch sind sie für Ermüdungsversuche mittels Servohydraulischer Prüfzylinder im Allgemeinen nicht geeignet [3].

4.1.4 Hydrostatisch geschmierte Lager

Hydrostatische Lager zeichnen sich, wie die soeben genannten hydrodynamischen Lager, ebenso durch ihren geringen, in den meisten Fällen vernachlässigbaren Reibbeiwert aus. Sie werden von einem gesondert betriebenen Ölkreislauf auf Betriebsdruck gebracht und brauchen somit keine Relativgeschwindigkeiten der Gleitflächen zueinander. Da sie jedoch sehr kostenintensiv und spezifisch in ihrer Anwendung sind, sind sie für Prüfstands aufgebauten wenig bis gar nicht geeignet [3].

4.1.5 Festkörpergelenke

Festkörpergelenke sind von ihren mechanischen Eigenschaften sehr gut geeignet. Sie sind spielfrei und haben einen vernachlässigbar kleinen Reibwert. Jedoch sind Handhabung und Kostenfaktor ein gewichtiges Argument gegen den Einsatz von Festkörpergelenken.

4.1.6 Sonderlager

Im Folgenden sind Sonderlager aufgeführt, welche für spezielle Einsatzgebiete und unter gewissen Umständen interessant sind, jedoch im Normalbetrieb nicht zum Einsatz kommen würden.

Passive Magnetlager

Passive Magnetlager werden faktisch nur als supraleitende Magnetlager ausgeführt [2]. Dies ist für uns nicht von Interesse, dadurch werden sie hier nicht weiter behandelt.

Aktive Magnetlager

Bei aktiven Magnetlagern wird die Lagerkraft durch geregelte Elektromagnete erzeugt. Sie benötigen eine ständige Stromversorgung [2].

Kugelgelenklager mit Vorspannung

Dieses Lager besteht beispielsweise aus zwei Lagerflanschen mit innen liegender Kugel. Die Lagerflanschen sind so gegeneinander vorgespannt, dass die Kugel spielfrei und mit geringer Reibung bewegt werden kann. Nachteile dieser Ausführung sind die erhöhten Kosten und die erschwerte Handhabung bei Ein- und Ausbau.

Kardangelenk

Sie eignen sich sowohl für Zug- und Druckschwelllastversuche, als auch für Wechsellastversuche. Sie sind praktisch spielfrei, robust und wartungsfrei. Mehrreihige Zylinderrollenlager sorgen für linienförmige Kraftübertragung mit geringer Hertz'scher Pressung, d.h. für kleine Reibmomente und damit nebenkraftfreie Funktionen der Gelenke selbst bei hoher Belastung. Nachteil dieser Ausführung ist die Verfügbarkeit sowie die Anschaffungskosten (eventuell nur durch Eigenbau möglich). Die nachfolgenden Bilder stammen von der Firma Schenk.

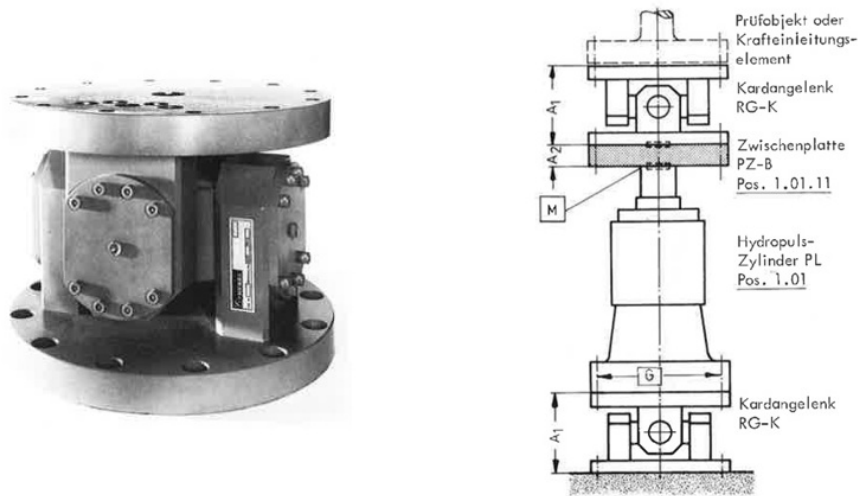


Abbildung 4.1: Kardangeln der Firma Schenk (links) und Anbau möglicher Hydraulik-Zylinder (rechts), Quelle: [6]

4.2 Auflistung verwendeter Lager

Die Gelenklagertypen, welche bei Ermüdungsversuchen meistens eingesetzt werden, sind wartungsfreie und wartungspflichtige Radialgelenkköpfe, sowie wartungsfreie Axialgelenklager in jeder Größe. In seltenen Fällen werden auch Festkörpergelenke oder herkömmlich zylindrische Gleitbuchsen verwendet.

Zusammenfassend werden die meist verwendeten Gelenklager in nachfolgender Liste aufgezählt:

- wartungsfreie Radialgelenkköpfe
- wartungspflichtige Radialgelenkköpfe
- wartungsfreie Axialgelenklager
- Festkörpergelenke

4.3 Allgemeines über Gelenklager mit sphärischen Flächen

Die in dieser Diplomarbeit behandelten Gelenklager/Gleitlager haben sphärische Gleitflächen. Sie sind eine Art Lager, die, wie der Name schon sagt, gelenkig sind und somit räumliche Einstellmöglichkeiten bieten. Derartige Lager bestehen aus einem kugeligen Innenteil und einem hohlkugeligen Außenteil. Durch diese sphärische Ausführung ist es

möglich, die beiden Lagerschalen um alle drei Achsen gegeneinander zu verdrehen. Diese Art von Gelenken sind besonders für den Prüfstandsbau geeignet und werden daher in dieser Diplomarbeit betrachtet. Die größten Vorteile, die sich durch die freie Rotationsmöglichkeit ergeben, sind:

- Fluchtungsfehler und Schiefstellungen werden ausgeglichen.
- Betriebsbedingte Bauteilverformungen spielen keine Rolle.
- Kantenpressung und somit übermäßige Bauteilbeanspruchungen treten im Vergleich zu zylindrischen Gleitlagern nicht auf. (Abbildung 4.2)

Die für die Prüfstandstechnik relevanten Gelenklager/Gleitlager sind:

- Axialgelenklager
- Radialgelenklager

Diese Lager sind als wartungspflichtige und als wartungsfreie Lager in verschiedensten Ausführungen erhältlich. In den folgenden Kapiteln werden diese näher behandelt.

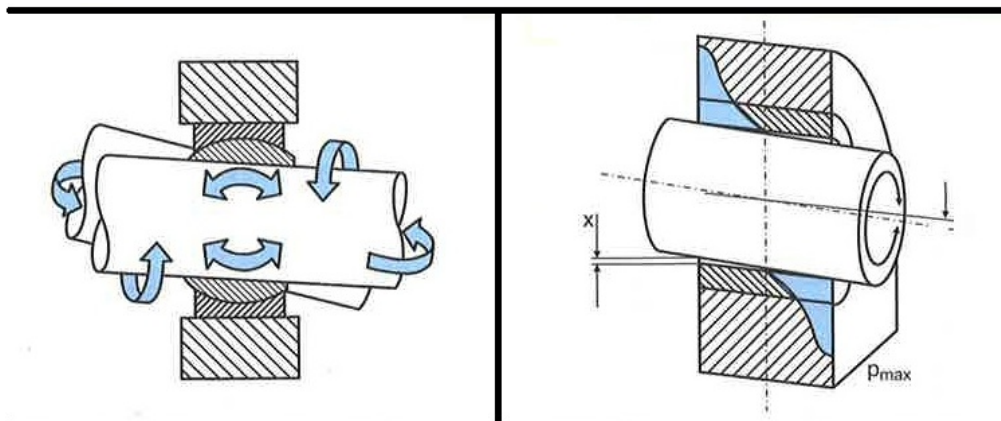


Abbildung 4.2: Vergleich eines sphärischen Gelenklagers und eines zylindrischen Gleitlagers, Quelle: [7, Seite 44]

Typische Bauarten für Gelenklager sind in Abbildung 4.3 ersichtlich.

Von links nach rechts: Radialgelenklager, Schräggelenklager und Axialgelenklager.

Die zuvor angesprochenen zwei Gruppen dieser Lager, sind die wartungsfreien Lager sowie die wartungspflichtigen Lager.



Abbildung 4.3: Gelenklagertypen von links nach rechts: Radialgelenklager, Schräggelenklager und Axialgelenklager, Quelle: [7, Seite 44]

4.4 Axialgelenklager

Axialgelenklager haben eine kugelige bzw. eine hohlkugelige Gleitfläche. Sie sind daher besonders gut für die momentenfreie Aufnahme von hohen Axialbelastungen geeignet, sowie gleichzeitig zur Aufnahme von gewisser Radialbelastung. Jedoch soll die Radialbelastung niemals mehr als 50 Prozent der Axialbelastung überschreiten.

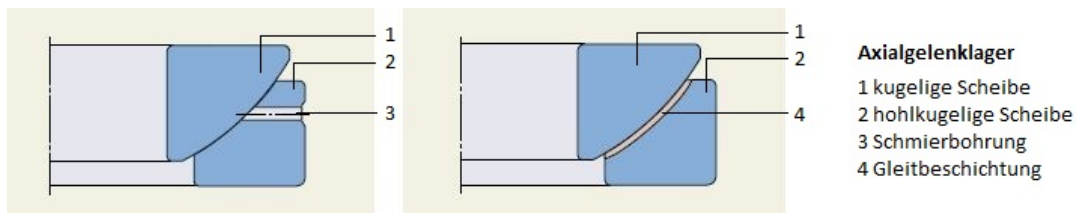


Abbildung 4.4: links: Wartungspflichtiges Stahl/Stahl Lager, rechts: Wartungsfreies Lager mit Beschichtung Quelle: [1]

In Abbildung 4.4 im linken Bild ist ein wartungspflichtiges Axialgelenklager mit einer Schmierbohrung, im rechten Bild ist ein wartungsfreies Axialgelenklager mit einer Gleitschicht zwischen den beiden Gleitflächen zu sehen.

4.5 Radialgelenkköpfe

Gelenkköpfe sind im Allgemeinen Gelenklagereinheiten, die aus einem Radialgelenklager und einem Gehäuse mit Gewindeschaft, dem sogenannten Stangenkopf, bestehen. Sie haben ebenso wie die Axialgelenklager eine sphärische Gleitfläche. Der Hauptunterschied zu den Axialgelenklagern besteht darin, dass sie für die Aufnahme von Radialbelastungen geeignet sind und nur bedingt Axialbelastung aufnehmen können.

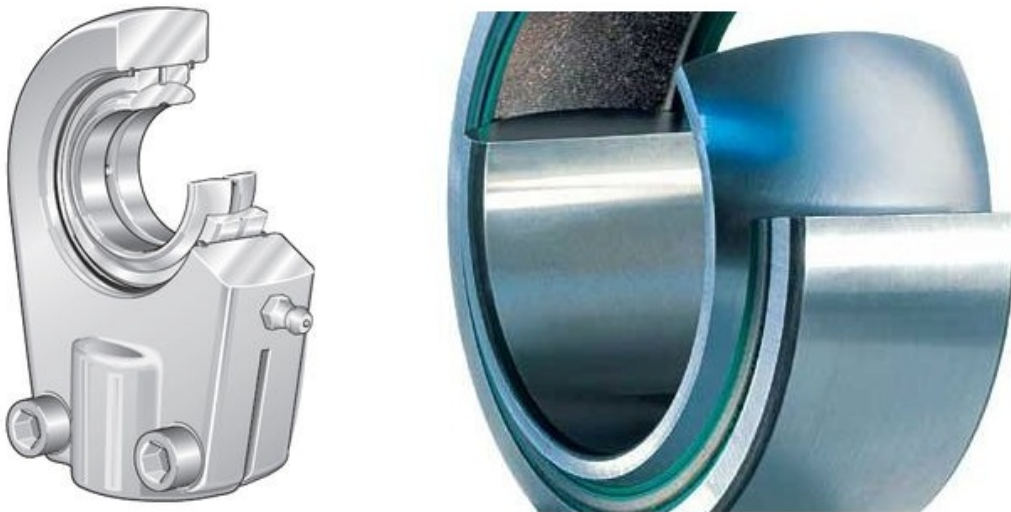


Abbildung 4.5: links: Wartungspflichtiges Stahl/Stahl Lager (Quelle: [1, Seite 144]), rechts: Wartungsfreies Lager mit Beschichtung (Quelle: [9])

4.6 Wartungsfreie Gelenklager

Wartungsfreie Lager benötigen während des Betriebes keine zusätzliche Wartung in Form von Nachschmierungen. Sie haben eine Feststoffschmierung in Form einer Beschichtung zwischen den Gleitflächen. Die Beschichtung dieser Lager besteht meist aus Polytetrafluoräthylen oder kurz PTFE. Die PTFE-Schicht weist eine niedrigere Scherfestigkeit als der Stahl auf und wird somit bei Relativbewegungen der Flächen abgeschert. Jener Abrieb dient als Schutzschicht und Schmierung für den Stahl. Damit dies zu jeder Zeit gewährleistet ist, brauchen diese Lager Relativbewegungen der gleitenden Schichten. Somit eignen sich wartungsfreie Lager sehr gut für oszillierende Bewegungen mit hohen Relativbewegungen. Jedoch für wechselnde Belastungen ohne Relativbewegungen sind sie nur bedingt geeignet.

In den folgenden Abbildungen 4.6 - 4.7 sieht man die Schnittdarstellungen von drei verschiedenen PTFE-Gleitschichten. Bei diesen Schnittdarstellungen handelt es sich um INA-Schaeffler KG Lagerbeschichtungen.

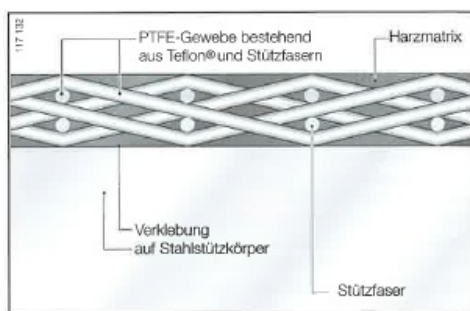


Abbildung 4.6: PTFE-Harzmatrix-Schnittdarstellung, Quelle: [1, Seite 48]

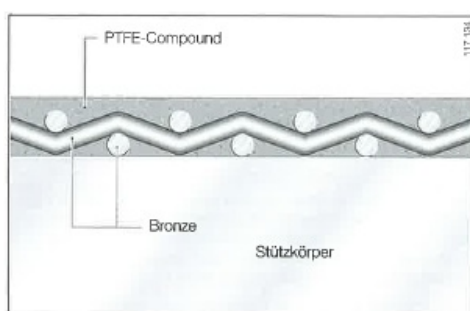


Abbildung 4.7: PTFE-Folie-Schnittdarstellung, Quelle: [1, Seite 49]

Diese PTFE Schichten sind, wie in den Abbildungen 4.6 - 4.7 zu sehen, auf den Grundkörper aufgebracht und bestehen zum Beispiel aus einem Gewebe von PTFE, eingebettet in Harz oder einem Metall mit guten Schmiereigenschaften wie Bronze in einem PTFE-Compound.

4.7 Wartungspflichtige Gelenklager

Wartungspflichtige Lager müssen regelmäßig gewartet werden. Die Schmierung erfolgt über Schmiernippel am Außenring. Diese Schmiernippel leiten den Schmierstoff über eine Bohrung (Abbildung 4.8 Punkt 5) zu einer Nut (Abbildung 4.8 Punkt 6) im Grundkörper und diese Nut verteilt den Schmierstoff am Umfang. Sie werden vorwiegend mit der Gleitpaarung Stahl/Stahl sowie Stahl/Bronze hergestellt. Durch die Schmierung ergibt sich ein Mischreibungsverhalten. Sie sind gut für Wechselbelastung mit schlag- und stoßartiger Beanspruchung geeignet, da bei einem Lastwechsel eine Seite entlastet wird und die unbelastete Zone geschmiert wird. Somit ergibt sich immer ein ausreichender Schmierfilm.

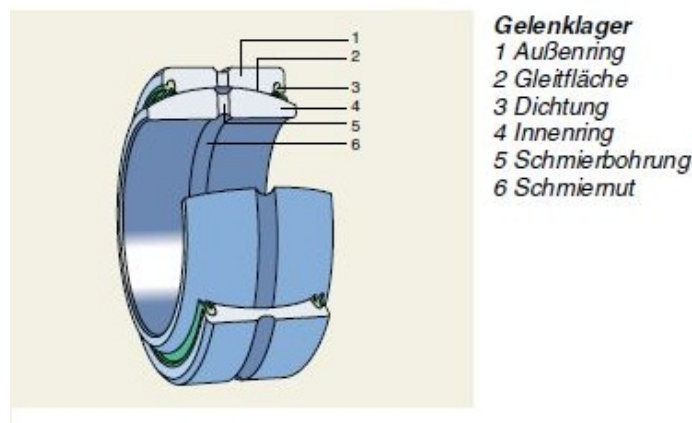


Abbildung 4.8: Schnitt eines wartungspflichtigen Lagers, Quelle: [7, Seite 44]

In Abbildung 4.8 ist ein Viertelschnitt eines wartungspflichtigen Radialgelenklagers mit Schmiernut zu sehen.

Die Reibungszustände, die sich in wartungspflichtigen Lagern ergeben, sind vorwiegend Mischreibungen. Voraussetzung dafür ist aber die Einhaltung der Schmierzyklen. Im Gegensatz zu den wartungsfreien Gelenklagern ist der Reibwert μ hier stark vom Schmierstoff, der Temperatur und dem Schmierzyklus abhängig. Das heißt, der Reibwert μ verändert sich stark während eines Schmierzyklus und bei Änderung der Temperatur.

Kapitel 5

Prüfstand zur Ermittlung von Reibung und Lagerspiel bei Gelenklagern

Zur Ermittlung von Lagereigenschaften bzw. der last- und lastwechselabhängigen Veränderungen von Lagereigenschaften im Bereich der Hydropulversuche (Ermüdungsversuche) wurde ein Prüfstand konzipiert, gefertigt und gebaut. Dieser Prüfstand ermittelt relevante Gelenkparameter wie Reibung und Lagerspiel und soll somit nach Durchführung von Versuchen und Auswertung der Ergebnisse bei Verwendung von Gelenklagern in Prüfstandsversuchen zur Verbesserung der Prüfqualität führen.

5.1 Anforderungen

Für die Konzipierung eines Prüfstands, der die oben genannten Aufgaben erfüllen soll, wurden zuerst die gewünschten Anforderungen evaluiert. Folgende Anforderungen sollen berücksichtigt werden:

- Messgrößen:
 - Haftreibung μ_H
 - Gleitreibung μ_G
 - Stick-Slip-Effekte
 - Lagerspiel
- Prüfung von Axialgelenklager und Radialgelenkköpfen
- Prüfung des Gelenks unter Variation der Kraft, Auslenkgeschwindigkeit und des Auslenkwinkels
- Einfacher Prüflingstausch
- Realitätsnahe Bedingungen (wie im Ermüdungsversuch)

Entsprechend diesem Anforderungsprofil wurde ein Prüfstand konzipiert, der wie ein Kniehebel aufgebaut ist. Dieser Kniehebel erlaubt die geforderten Freiheitsgrade und wurde so ausgelegt, dass bei maximaler Prüflast keine Verformung der Vorrichtungsteile stattfindet.

Mit dem gewählten Aufbau können sehr realitätsnah die realen Gelenkbeanspruchungen beim Einsatz in Ermüdungsversuchen nachgebildet werden. Weiters wurde darauf Wert gelegt, die zu testenden Lager weitgehend zu isolieren, um ohne signifikante störende Einflüsse von außen prüfen zu können. Aus diesem Grunde wurden im Prüfstandsaufbau nur *Festkörpergelenke* verwendet. *Festkörpergelenke* haben den großen Vorteil, dass sie bis auf Materialdämpfungen (vernachlässigbar) keine unbekanntes nichtlinearen Einflüsse in die Prüfung einbringen. Alle Einflüsse auf die Prüfung können im Voraus ermittelt und rechnerisch im Messsignal kompensiert werden (siehe Prüfstandskalibrierung, Abschnitt 5.5).

Eine weitere Anforderung an den Prüfstand ist die Möglichkeit, Auslenkungen des Prüflings um 2° zu erlauben. Die Geometrie des Prüfstands wurde so ausgelegt, dass die Verformung der Festkörpergelenke am oberen Ende und am unteren Ende ident ist, um eine Überbelastung einzelner Festkörpergelenke zu vermeiden. (siehe Abbildung 5.1)

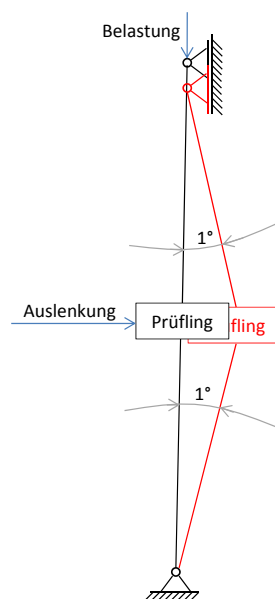


Abbildung 5.1: Prinzipskizze für einen Reibmomentprüfstand. In der Mitte der Skizze befindet sich das zu prüfende Gelenklager (Prüfling). Im oberen und unteren Bereich der Einspannung befinden sich Festkörpergelenke.

Die eingeleitete Belastung in die *Festkörpergelenke* wurde in Abschnitt 5.3 mit einer Finite-Elemente-Simulation hinsichtlich Festigkeitsbetrachtung überprüft. Dies geschah, um sicherzustellen, dass die Gelenke im Prüfbetrieb nicht überbelastet und somit beschädigt werden.

5.2 Konstruktion

Der Prüfstand wird als Kniehebel ausgeführt (siehe 5.1). In Abbildung 5.2 ist der Prüfstand mit eingebautem Prüfling (Axialgelenklager GE 100AW) abgebildet.

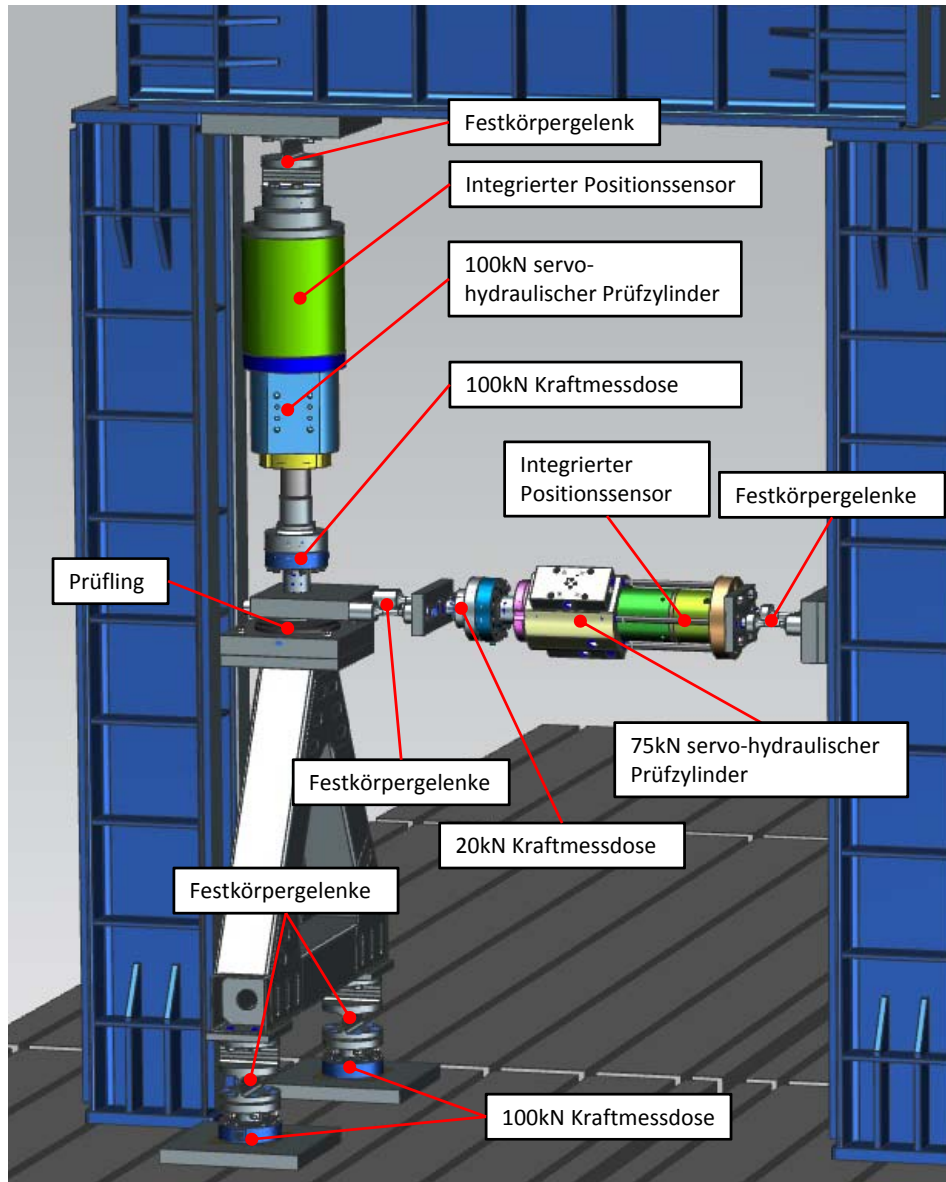


Abbildung 5.2: Reibmomentprüfstand mit eingebautem Axialgelenklager GE100AW.

Zur Einleitung der Vertikalkraft (Lagerkraft) wird ein Hydraulikzylinder (Größe 100 kN) verwendet. Horizontalbewegungen zur Auslenkung des zu prüfenden Lagers werden durch den Horizontalzylinder (Größe 75 kN) eingeleitet. Als vertikale Abstützung nach unten dient eine Schweißkonstruktion in Form eines Dreiecks. Zwischen diesem Dreieck und dem vertikalen 100 kN Zylinder werden die Module mit dem Prüfling eingebaut. Für die

Prüfung der Radialgelenkköpfe muss der Prüfstand geringfügig umgebaut werden (siehe Kapitel 5.2.2).

5.2.1 Prüfstands Aufbau zur Prüfung eines Axialgelenklagers

Wie in Kapitel 5.2 schon erwähnt und in Abbildung 5.2 ersichtlich, ist der Prüfstand in vier Hauptbaugruppen eingeteilt. Diese Baugruppen sind:

- Vertikalbelastung
- Horizontalauslenkung
- Vertikalabstützung
- Prüfingsmodule

In den folgenden Punkten wird näher auf die einzelnen Baugruppen eingegangen.

Vertikalbelastung

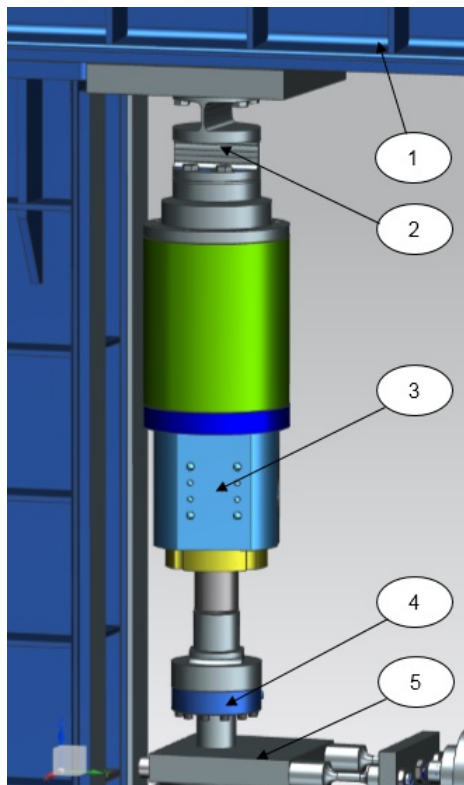


Abbildung 5.3: Vertikalbelastung bestehend aus: Steherkonsole ((länge 2 m) (1), zweischichtiges Festkörpergelenk (2), 100 kN Hydraulikzylinder (3), 100 kN Kraftmessdose (4), Horizontalblock (5).

Die Vertikalbelastung (siehe Abbildung 5.3) wird mit einem 100 kN Hydraulikzylinder (3) realisiert, welcher Druck- und Zugkräfte in den Prüfling einleiten kann. Dieser Zylinder ist über ein zweiachsiges Festkörpergelenk (2) auf einem 2 Meter Träger (1), der als Traverse dient, befestigt. Die Regelung dieses Zylinders erfolgt über eine 100 kN Kraftmessdose (4) der Fa. Interface (siehe Kapitel 5.4). Die Anbindung dieser Baugruppe auf die Baugruppe der Prüflingsmodule, sowie auf die Baugruppe der Horizontalauslenkung, erfolgt über den Horizontalblock (5).

Horizontalauslenkung

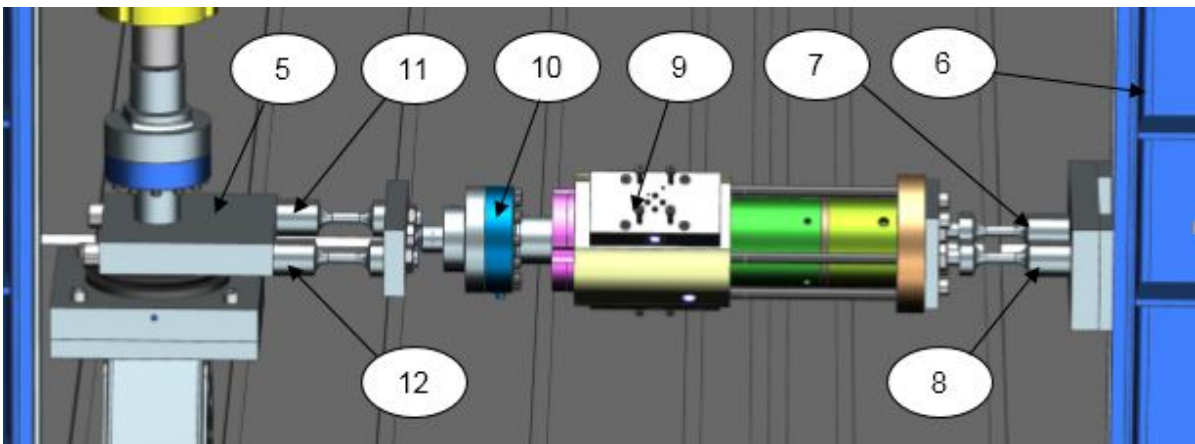


Abbildung 5.4: Horizontalauslenkung bestehend aus: Horizontalblock (5), 2,5 Meter Vertikalträger (6), vier baugleiche Festkörpergelenke (7,8,11,12), 75 kN Hydraulikzylinder (9), 20 kN Kraftmessdose (10).

Die Baugruppe zur Horizontalauslenkung (Abbildung 5.4) besteht aus einem 75 kN Hydraulikzylinder (9), der die Auslenkung des Lagers im Kugelmittelpunkt durchführt. Weiters ist eine 20 kN Kraftmessdose (10) der Fa. Interface (siehe Kapitel 5.4) im Kraftfluss integriert, mit der die Kräfte, die zur Auslenkung nötig sind, gemessen werden. Auf der einen Seite ist der Zylinder (9) über zwei baugleiche Festkörpergelenke (7,8) mit einem Vertikalträger (6) fest verbunden. Auf der anderen Seite ist der Zylinder (9) mit entsprechenden Adaptern mit der 20 kN Kraftmessdose (10) verbunden. Diese Kraftmessdose (10) ist weiters über entsprechende Adapter mit zwei baugleichen Festkörpergelenken (11,12) auf dem Horizontalblock (5) befestigt und damit mit dem restlichen Prüfstand gekoppelt.

Vertikalabstützung

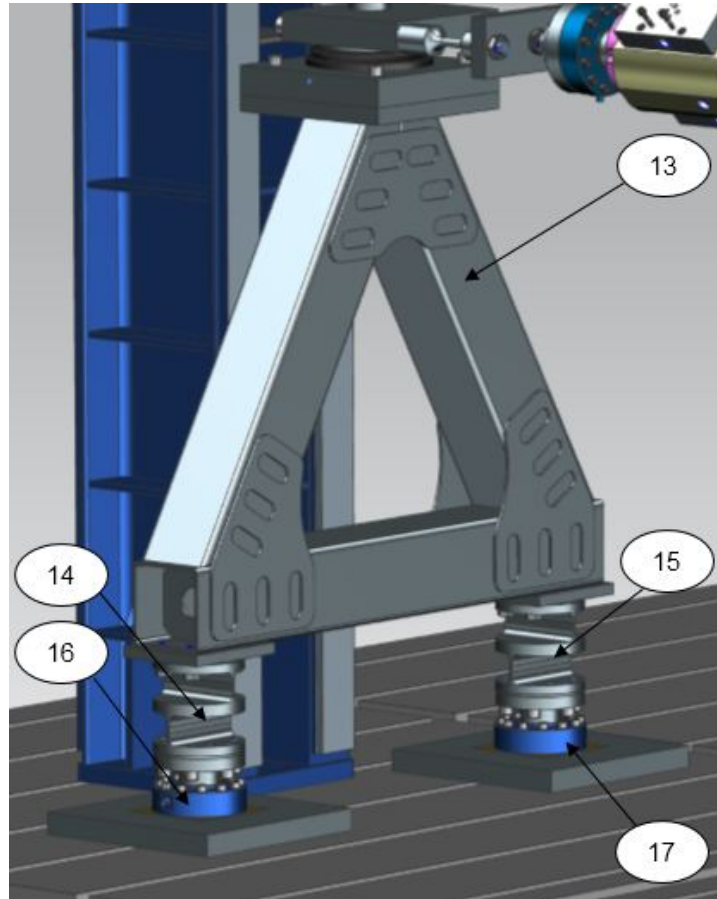


Abbildung 5.5: Vertikalabstützung bestehend aus: Dreiecksabstützung (13), zwei zweiachsigen Festkörpergelenken (14, 15), zwei 100 kN Kraftmessdosen (16, 17).

Die Vertikalabstützung ist wie in Abbildung 5.5 dargestellt. Über entsprechende Adapter und Aufspannplatten sind zwei 100 kN Kraftmessdosen (16,17) auf das Aufspannfeld gespannt. Mittels der Kraftmessdosen (16,17) können die nach unten ausgeleiteten Kräfte verifiziert und kontrolliert werden. Auf den Kraftmessdosen (16,17) ist mittels zweier baugleicher Festkörpergelenke (14,15) eine mit Blechen versteifte Dreiecksabstützung (13) geschraubt. Die Kombination des Dreiecks mit den zwei Festkörpergelenken ist so gewählt, weil die Freiheitsgrade der Abstützung bis auf einen reduziert wurden. Wir erhalten damit ein Hebel-System, welches sich prüflingspezifisch nur noch in einer Richtung verschieben lässt. Die Prüflingsmodule werden dann auf dieser Vertikalabstützung, sowie auf dem Horizontalblock (5), befestigt.

Prüflingsmodule

Die Module sind so aufgebaut, dass sich einerseits der Kugelmittelpunkt bei jedem Axialgelenklager auf der gleichen Position im Prüfstand befindet und andererseits sich die Gesamthöhe der einzelnen Module nicht verändert. Dies ist nötig, um den Horizontalzylinder (9) für jedes zu prüfende Lager ohne weitere Umbauten in waagrechter Position zu halten.

- GE 30 AW:

In Abbildung 5.6 besteht das Modul GE 30 AW aus dem universell für alle Axialgelenklager Module verwendeten Horizontalblock (5), der die Anbindung an die Zylinder gewährleistet, dem Prüfling (18), einem Adapterblock (19), der die richtige Position des Prüflings sicherstellt, einem Auspressring (21), einem Befestigungsbolzen (20), der den Prüfling mit dem Horizontalblock (5) verbindet, einer Modulgrundplatte (22), die für jeden Prüfling die Anbindung an die Abstützung darstellt und einem Zentrierbolzen (23), der die Modulgrundplatte (22) auf der Vertikalabstützung zentriert.

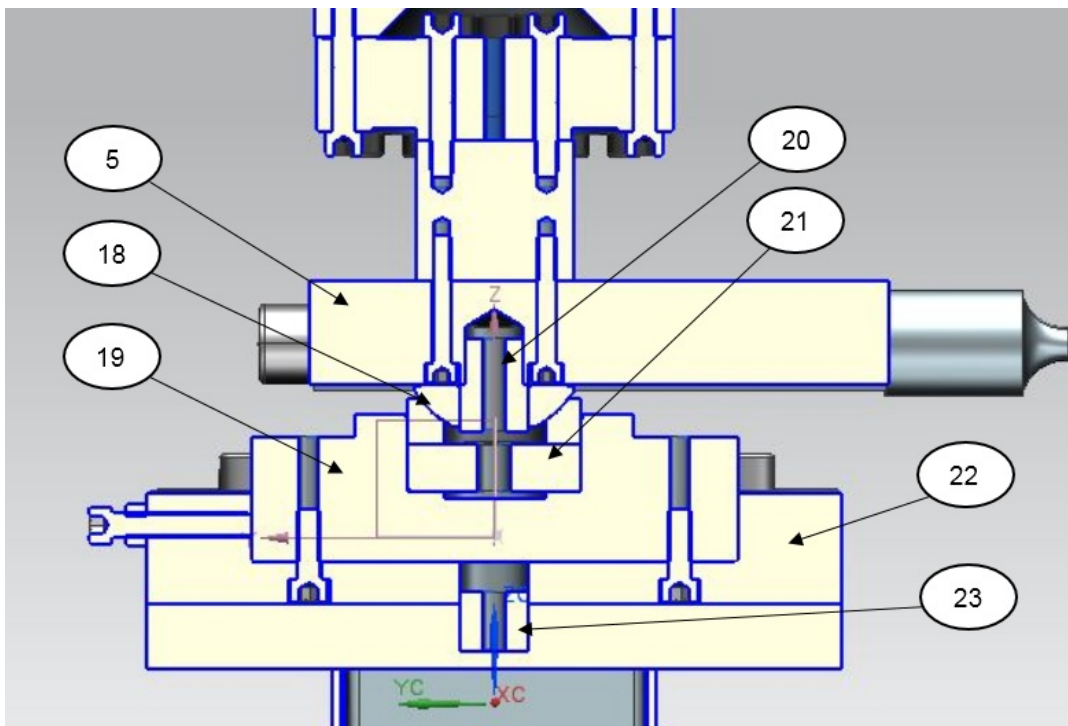


Abbildung 5.6: Schnitt durch das Modul GE 30 AW bestehend aus: Horizontalblock (5), GE 30 AW (18), Adapterblock GE 30 AW (19), Befestigungsbolzen (20), Auspressring (21), Modulgrundplatte (22), Zentrierbolzen (23).

- GE 70 AW

Für das Modul GE 70 AW wird dieselbe Anbindung an die Zylinderbaugruppen

und die Dreiecksabstützung verwendet wie schon bei Modul GE 30 AW. In Abbildung 5.7 wird dargestellt, wie die Zylinderbaugruppen mittels des Horizontalblocks (5) und des Befestigungsbolzens (20) an die Modulbaugruppe angebunden sind. Dieser Befestigungsbolzen (20) ist im Adapter GE 70 AW Kugel (24) eingepresst und dieser Adapter ist wiederum im Püfling GE 70 AW (25) eingepresst. Die Pfanne des Prüflings befindet sich in einem geschlitzten Ring (Adapter GE 70 AW Pfanne (26), der sich in der Modulgrundplatte (22) befindet und mittels zweier horizontal angebrachter Schrauben, je nach Einbausituation, verspannt wird. Die Modulgrundplatte (22) befindet sich wiederum auf der Dreiecksabstützung und wird mit dem Zentrierbolzen (23) zentriert.

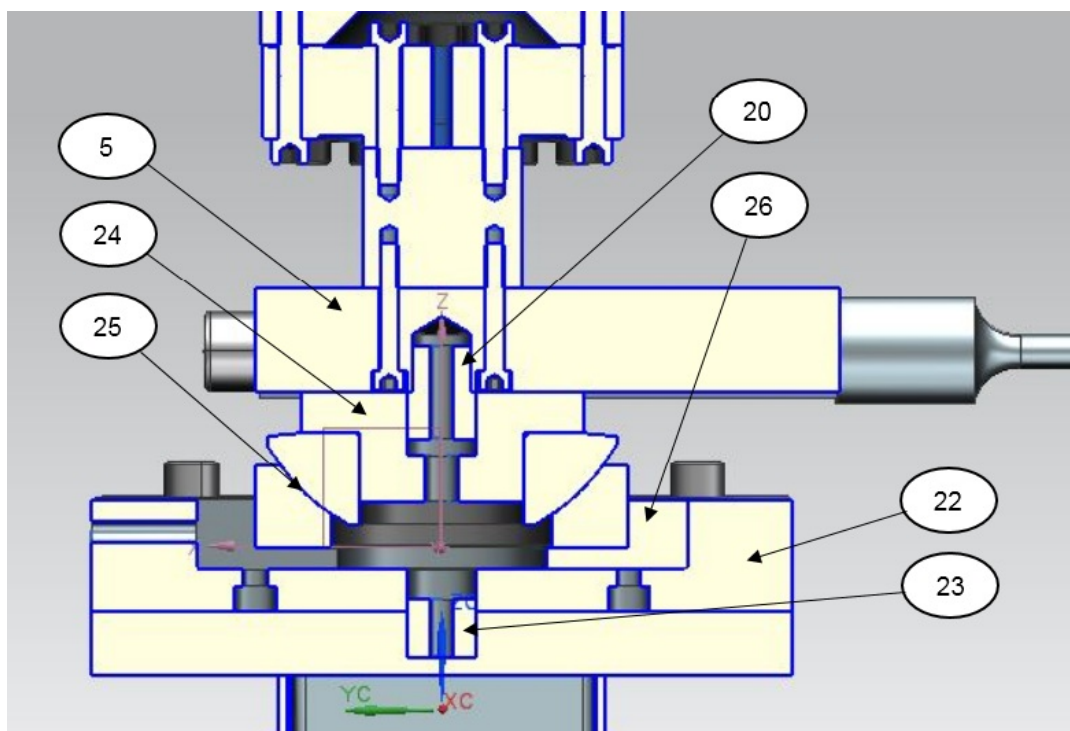


Abbildung 5.7: Schnitt durch das Modul GE 70 AW bestehend aus: Horizontalblock (5), Befestigungsbolzen (20), Adapter GE 70 AW Kugel (24), GE 70 AW (25), Adapter GE 70 AW Pfanne (26), Modulgrundplatte (22), Zentrierbolzen (23).

- GE 100 AW

Der Prüfling GE 100 AW Abbildung 5.8, wird wie bei den anderen Prüflingen mittels des Horizontalblocks (5) an die Zylinder gekoppelt. Der Adapter GE 100 AW (28) wird wiederum mittels des Befestigungsbolzens (20) am Horizontalblock (5) und dem Lager GE 100 AW (27) befestigt und die Modulgrundplatte (22) befestigt den Prüfling mittels des Zentrierbolzens (23) und den Schrauben an der Dreiecksabstützung.

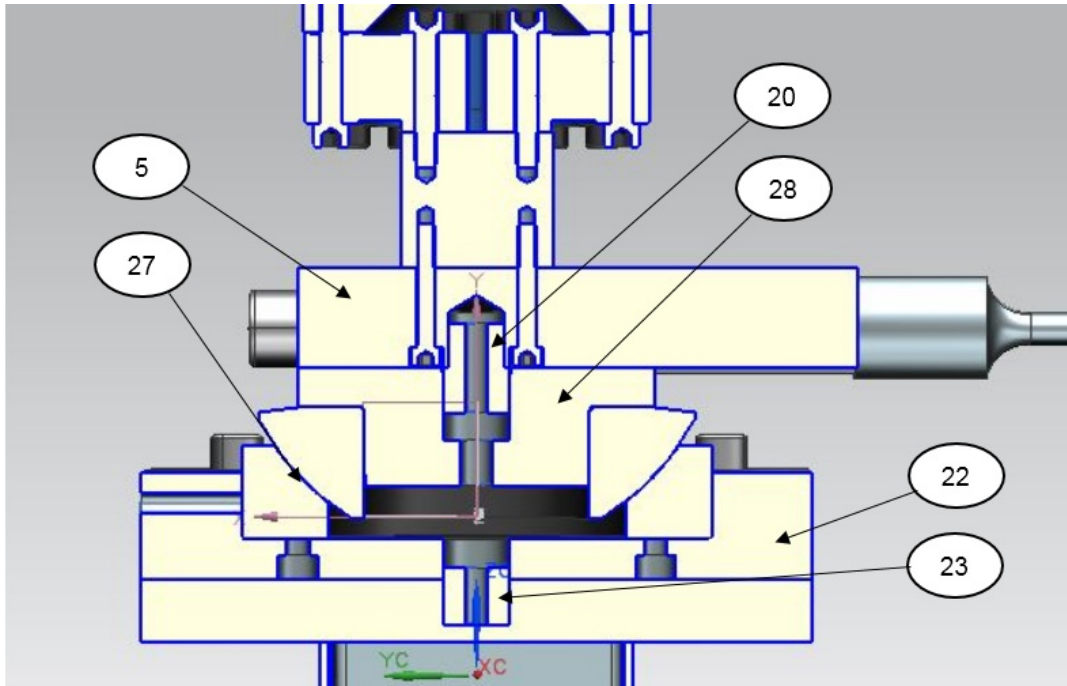


Abbildung 5.8: Schnitt durch das Modul GE 100 AW bestehend aus: Horizontalblock (5), Befestigungsbolzen (20), GE 100 AW (27), Adapter GE 100 AW (28), Modulgrundplatte (22), Zentrierbolzen (23).

5.2.2 Prüfstands Aufbau zur Untersuchung eines Radialgelenkkopfes

In Abbildung 5.9 ist der Reibmomentprüfstand in der Konfiguration für Radialgelenkköpfe dargestellt. In dieser Abbildung ist ein Radialgelenklager vom Typ GIHR 60 DO eingebaut. Bis auf die Anbindung der Zylinder und die Anbindung der Abstützung unterscheidet sich der Prüfstand nicht zum Aufbau für Axialgelenklager. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel nur noch die unterschiedlichen Einbaumodule der Prüflinge behandelt. Der Rest des Aufbaus ist analog dem Kapitel 5.2.1.

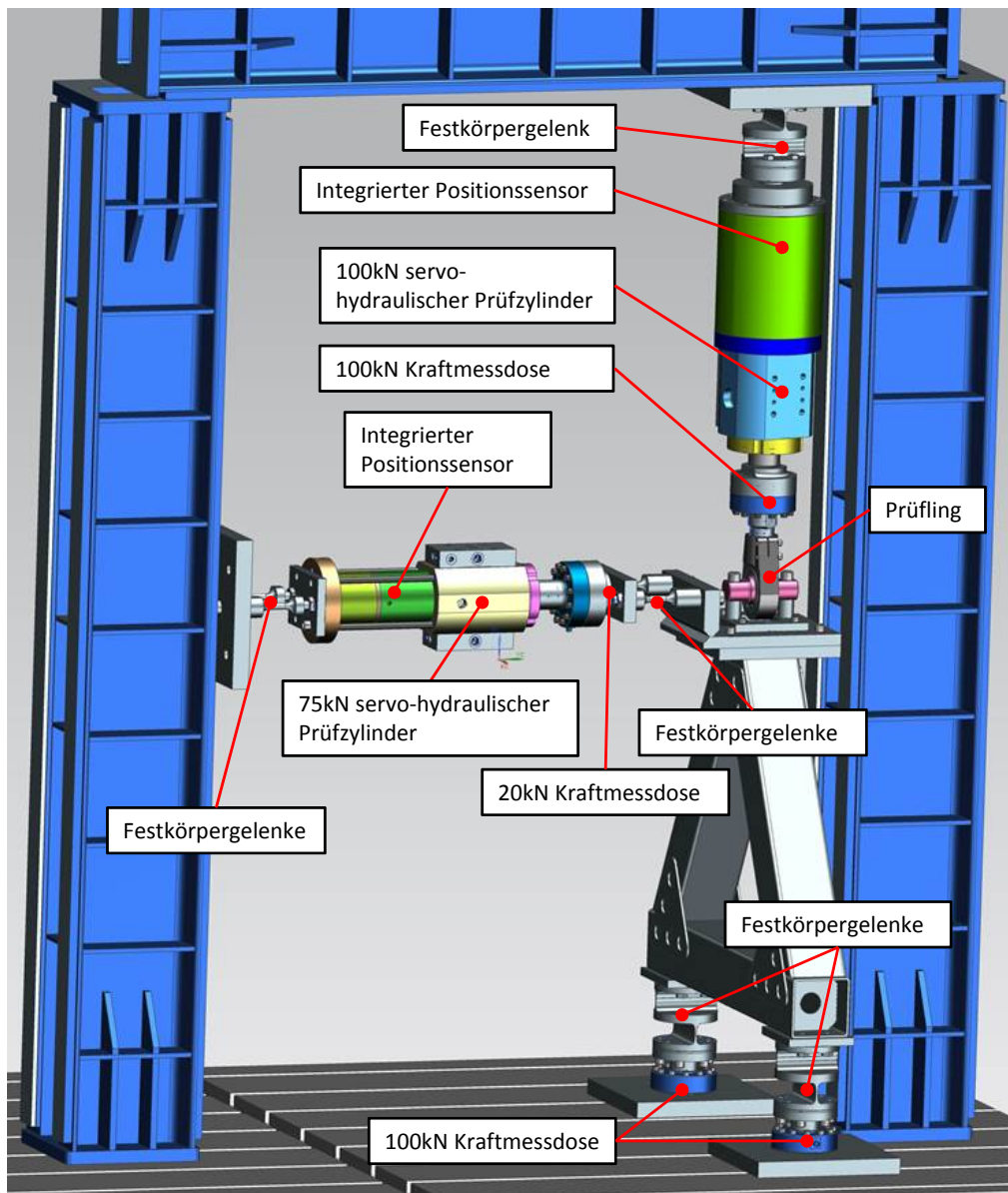


Abbildung 5.9: Reibmomentprüfstand Radialgelenkkopf GIHR 60 DO

Prüfingsmodule Radialgelenkkopf

Analog zu den Modulen für die Axialgelenklager sind die Prüfingsmodule für Radialgelenkköpfe derartig aufgebaut, dass der Kugelmittelpunkt der Lager und die Achse des Horizontalzylinders fluchtend sind. Dies ist wichtig, um keine zusätzlichen Momente während der Prüfung einzubringen.

- GAR 40 UK-2RS
Das Lager GAR 40 UK-2RS (30), wie in Abbildung 5.10 zu sehen ist, wird in einen Kraftmessdosen-Stempel (29) eingeschraubt und mit einer 100kN Kraftmessdose verbunden. In das Lager wird ein Bolzen (31) eingepresst und mittels Distanzen (34) und einer Adapterplatte (35) auf die Auslenkplatte (32) geschraubt. Die Auslenkplatte ist einerseits mit Schrauben auf der Dreiecksabstützung angeschraubt und andererseits mittels zweier Festkörpergelenke (33) auf der Horizontalauslenkung befestigt. Die Abstände und Geometrien sind wieder so gewählt, dass eine Auslenkung um den Kugelmittelpunkt erfolgt.

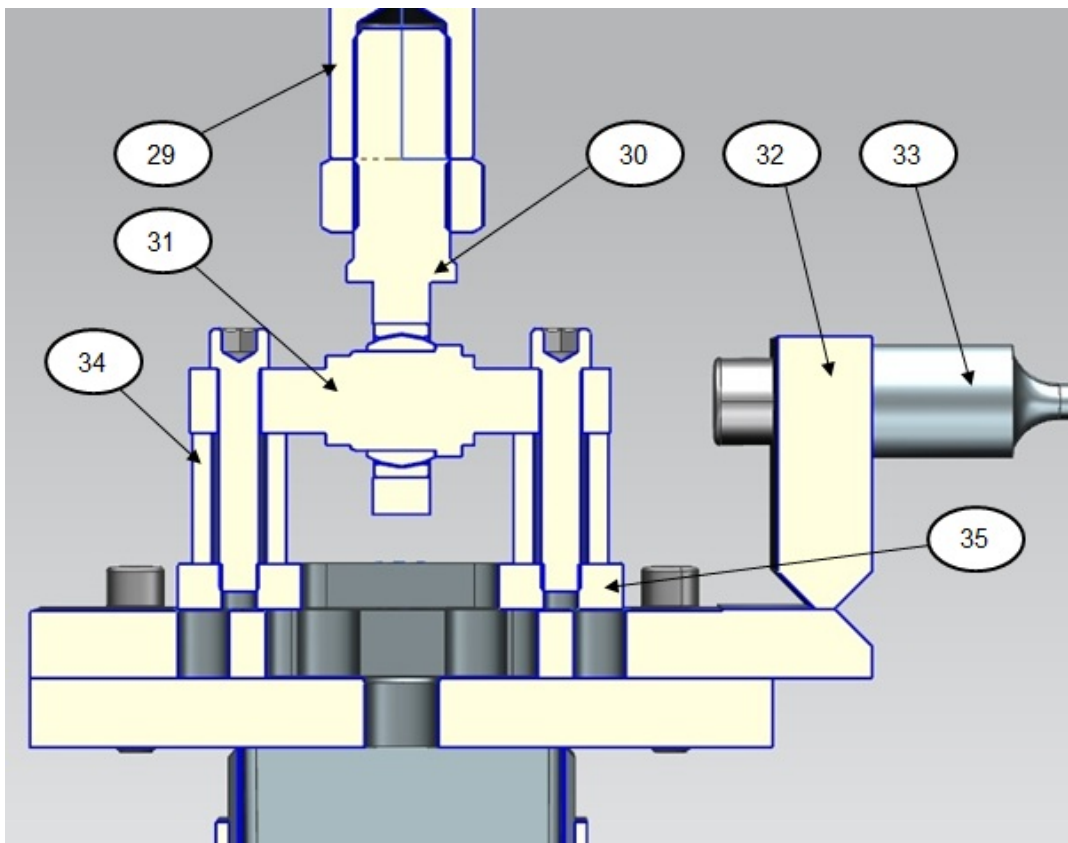


Abbildung 5.10: Modul GAR 40 UK-2RS bestehend aus: Kraftmessdosenstempel (29), GAR 40 UK-2RS (30), Bolzen (31), Auslenkplatte (32), Festkörpergelenk (33), Distanzhülsen (34), Adapterplatte (35).

- GIHR 60 DO

Das GIHR 60 DO (36), wie in Abbildung 5.11 dargestellt, wird auf den Kraftmessdosen Stempel (29) aufgeschraubt, der auf einer 100 kN Kraftmessdose befestigt wird. In den Gelenkkopf (36) wird ein Bolzen (37) eingepresst und mittels zweier M16 Schrauben, sowie dazugehöriger Distanzhülsen (38) auf der Adapterplatte (35) festgeschraubt. Diese Adapterplatte (35) wird dann auf die Auslenkplatte (32) geschraubt. Die Auslenkplatte (32) ist dann, wie schon bei den vorigen Modulen mittels zweier Festkörpergelenke (33) auf der Horizontalauslenkung befestigt. Wiederum gilt bei diesem Modul, wie bei allen anderen zuvor, dass die Achse der Horizontalauslenkung durch den Kugelmittelpunkt des Gelenkes geht.

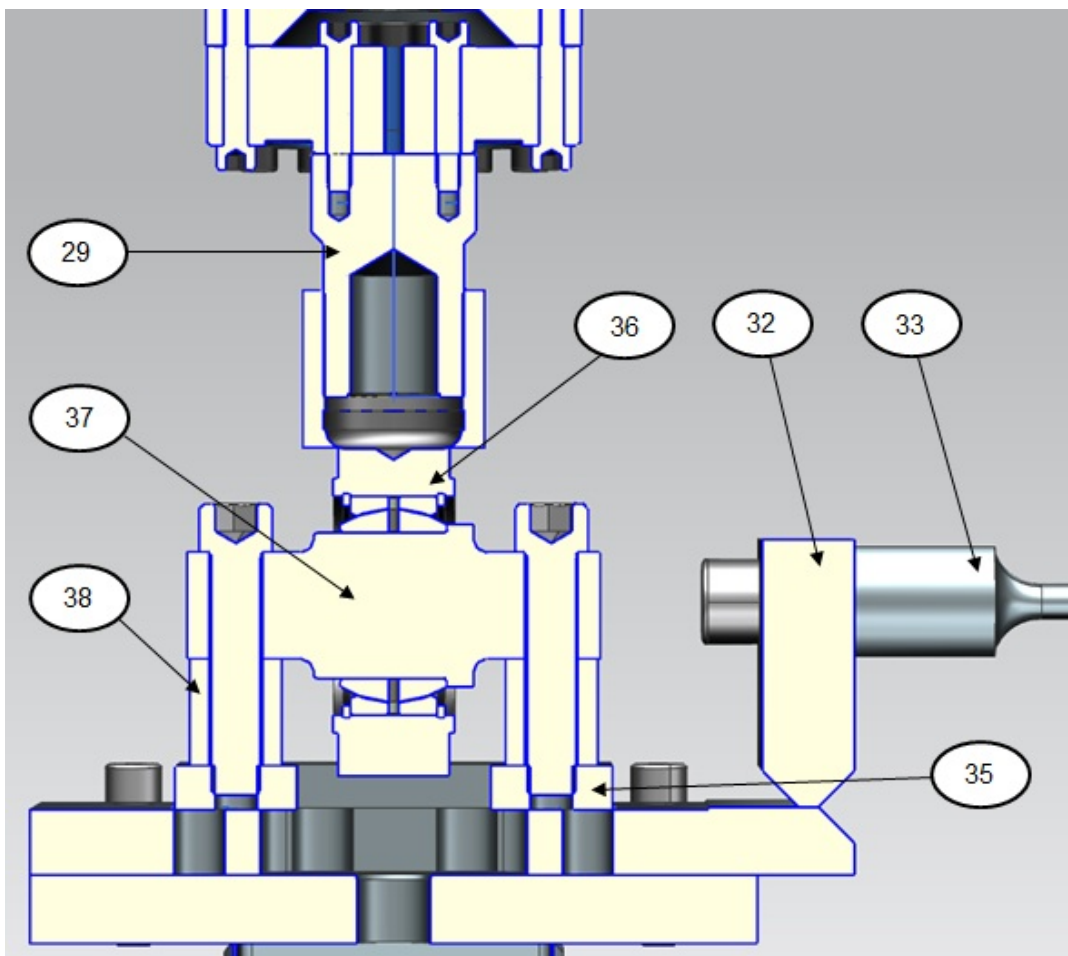


Abbildung 5.11: Schnitt durch das Modul GIHR 60 DO bestehend aus: Kraftmessdosenstempel (29), Auslenkplatte (32), Festkörpergelenk (33), Adapterplatte (35), GIHR 60 DO (36), Bolzen (37), Distanzhülsen (38).

- GIHR 80 DO

In Abbildung 5.12 ist das Modul GIHR 80 DO abgebildet. Es ist der größte prüfba-re Radialgelenkkopf, für den der Prüfstand ausgelegt wurde. Der Aufbau ist analog zu den zuvor beschriebenen Modulen. In einen Kraftmessdosenstempel (39), der auf der einen Seite mit einer 100 kN Kraftmessdose verbunden ist, wird das Gelenklager GIHR 80 DO (40) aufgeschraubt. In das Gelenklager (40) wird ein Bolzen (41) eingepresst, der mit zwei M20 Schrauben und dazugehöriger Distanzhülsen (42) direkt auf die Auslenkplatte (32) geschraubt wird. Die Auslenkplatte (32) wird wiederum mittels zweier Festkörpergelenke (33) mit der Horizontalauslenkung verbunden. Wie zuvor gilt auch hier, dass die Zylinderachse der Horizontalauslenkung im Kugelmittelpunkt sein muss.

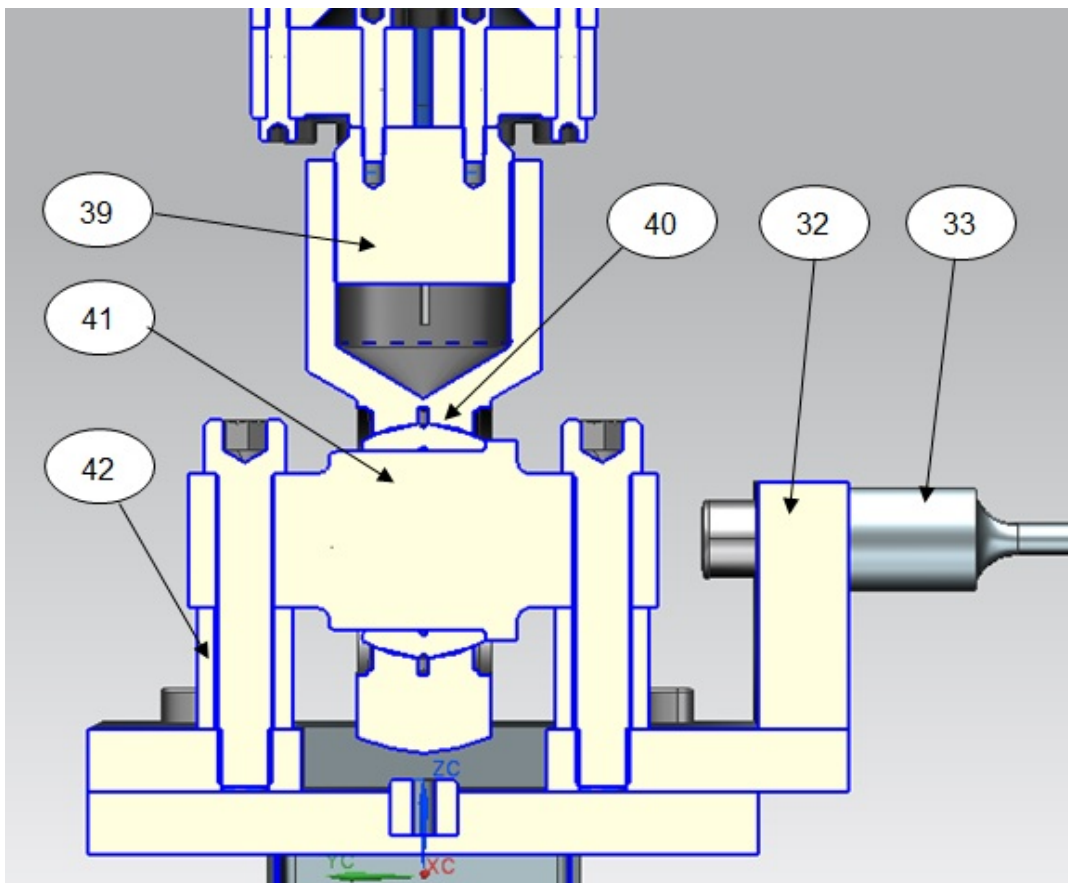


Abbildung 5.12: Schnitt durch das Modul GIHR 80 DO bestehend aus: Auslenkplatte (32), Festkörpergelenk (33), Kraftmessdosenstempel (39), GIHR 80 DO (40), Bolzen (41), Distanzhülsen (42).

5.3 Charakterisierung der verwendeten Festkörpergelenke

Die verwendeten Festkörpergelenke wurden am Institut für Leichtbau entworfen und gebaut (Abbildung 5.13). Vor deren Verwendung wurden die Gelenklager für die angedachten Prüfstandslasten mittels dem Finite-Elemente-Programm Marc Mentat (Fa. MSC) auf maximal auftretende Spannungen untersucht.

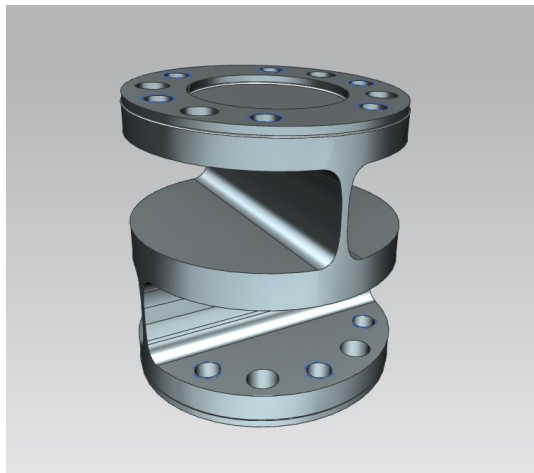


Abbildung 5.13: Zweiachsiges Festkörpergelenk

Für eine möglichst genaue Simulation wurde nicht nur das Festkörpergelenk simuliert, sondern auch die angrenzenden Bauteile. Somit wurde die Charakteristik des Prüfstandes in die Simulation eingebunden. Hierfür wurden die direkt angrenzenden Teile mit 3D Elementen modelliert. Nach einer festgelegten Distanz wurden die Teile mit 1D Elementen, inklusiv hinterlegter Geometrie (Beams), modelliert. In Abbildung 5.14 ist das fertig modellierte und vernetzte Modell ersichtlich.

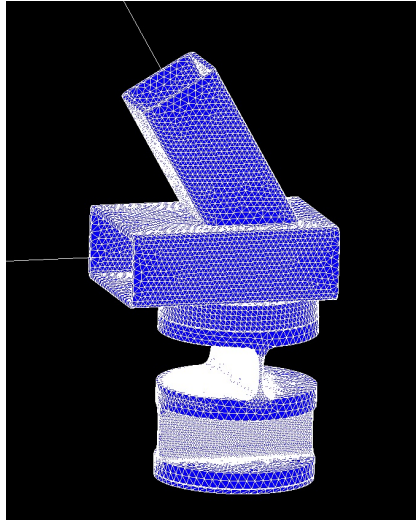


Abbildung 5.14: Mesh für zweiachsiges Festkörpergelenk (inklusive angrenzender Bauteile).

Das vollständig ausmodellerte Finite-Element-Modell bildet, die in Abbildung 5.5 dargestellte Dreiecksabstützung mittels 3D bzw. 1D Elemente, die Simulation nach (Abbildung 5.15). Die für diese Simulation verwendeten 3D-Elemente waren CTETRA 10 Elemente (Tetraeder Elemente mit 10 Knoten pro Element). Die Dreiecksabstützung hat, wie dargestellt, zwei Festkörpergelenke und ein aus Formrohre bestehendes Dreieck. Die Belastung wird am oberen Punkt des Dreieckes eingeleitet. Hierbei handelt es sich um die Maximalbelastung des Prüfstandes. Das entspricht einer Kraft von $F_{Vert} = 80 \text{ kN}$ in Richtung der y-Achse und einer Auslenkung von $s_{Hor} = \pm 9,72 \text{ mm}$ in der z-Achse. Die Auslenkung von $s_{Hor} = \pm 9,72 \text{ mm}$ entsprechen einem maximalen Auslenkwinkel der Dreiecksabstützung von $\alpha = \pm 1^\circ$. Da die Geometrie des Prüfstandes so gewählt wurde, dass beide Teile der Gelenklager gleichermaßen ausgelenkt werden, ergibt sich eine absolute Auslenkung des Lagers von $\psi_{max} = \pm 2^\circ$. Siehe auch Abbildung 5.1.

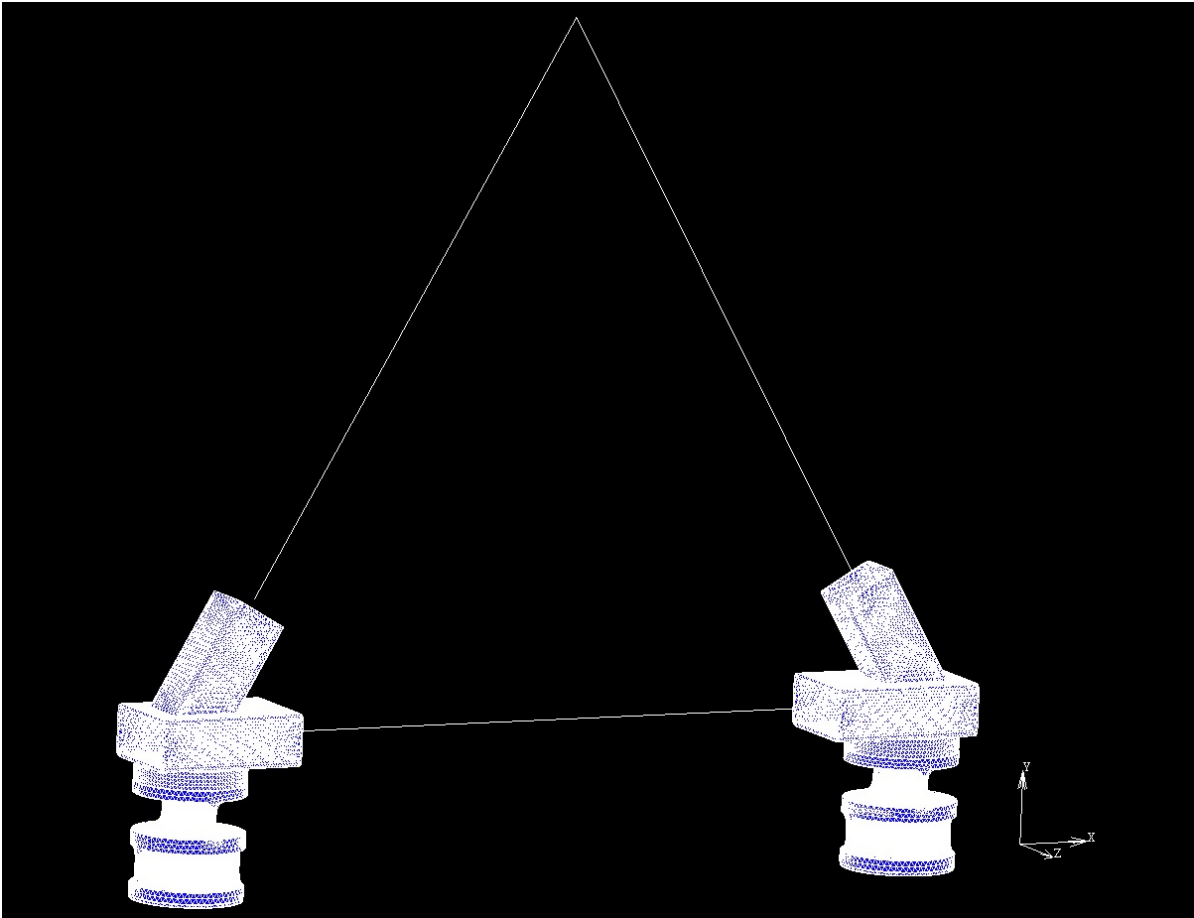


Abbildung 5.15: Mesh für Dreiecksabstützung

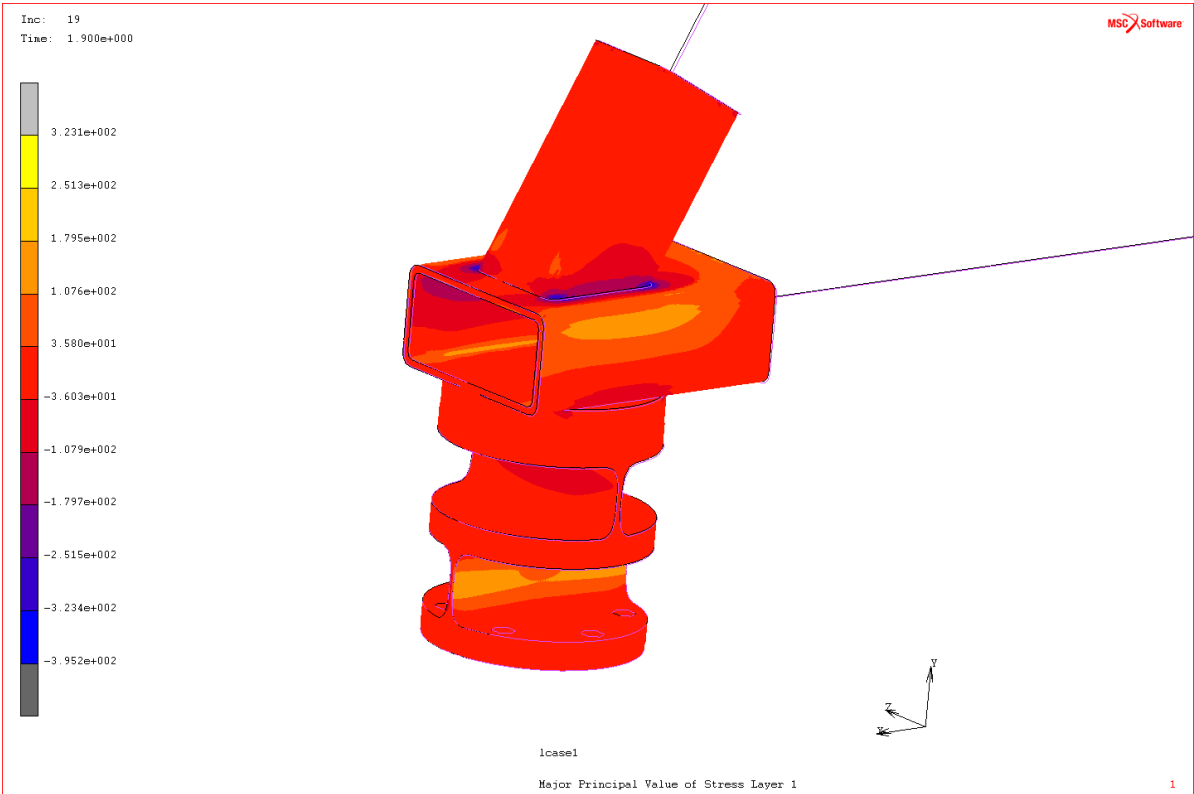


Abbildung 5.16: FEM-Simulation Zugseite

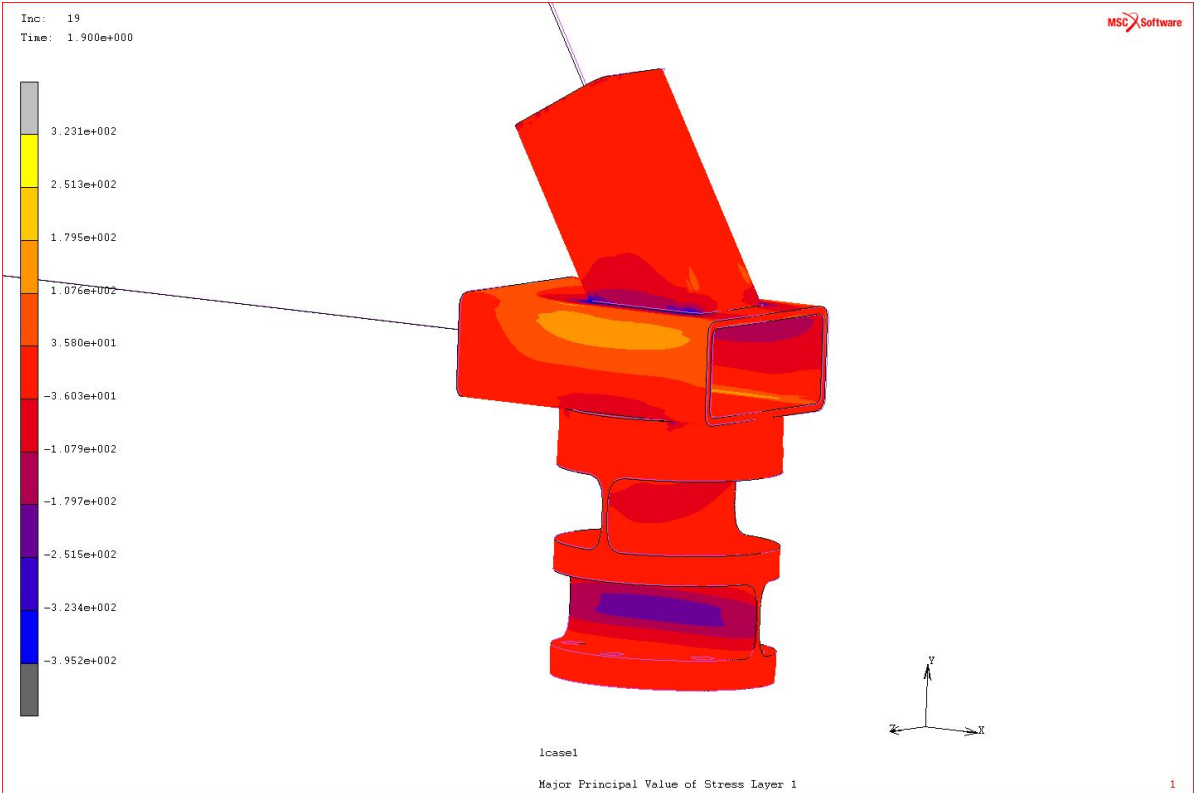


Abbildung 5.17: FEM-Simulation Druckseite

Die Abbildungen 5.16 - 5.17 zeigen das simulierte Ergebnis des zuvor erstellten Finite-Element-Modelles.

Wie erwartet sind die maximal auftretenden Spannungen $\sigma_{max} = -395,2 \text{ N/mm}^2$ auf der Druckseite des mit Biegung und Druck beanspruchten Steges. Da diese Festkörpergelenke jedoch aus einem hochfesten Stahl hergestellt sind, liegen Spannungen bis $\sigma_{Grenz} = \pm 500 \text{ N/mm}^2$ weit unter der maximalen Streckgrenze des Materiales ($R_e = 1100 \text{ N/mm}^2$). Somit stellt der Betrieb im Prüfstand unter den auftretenden Prüfbelastungen kein Problem für die Festkörpergelenke dar.

Im Bereich des am realen Festkörpergelenks applizierten DMS liefert die Simulation Zugspannungen von $\sigma_{Zug} = 100 \text{ N/mm}^2$ und Druckspannungen von $\sigma_{Druck} = -200 \text{ N/mm}^2$. In Abschnitt 5.3.1 werden diese Simulationsergebnisse mit den mittels an den Gelenken applizierten DMS gemessenen Werten verglichen.

5.3.1 Messung der realen Spannungen am Festkörpergelenk

In Abbildung 5.18 ist das zuvor mittels Finite-Element-Simulation dargestellte Festkörpergelenk in Realgeometrie dargestellt. Am höher beanspruchten Steg des Festkörpergelenks sind beidseitig Dehnmessstreifen, wie abgebildet, appliziert. Diese messen infolge der Verformung des Bauteils die auftretende Spannung gemittelt über die Fläche des Messgitters am Dehnmessstreifen.

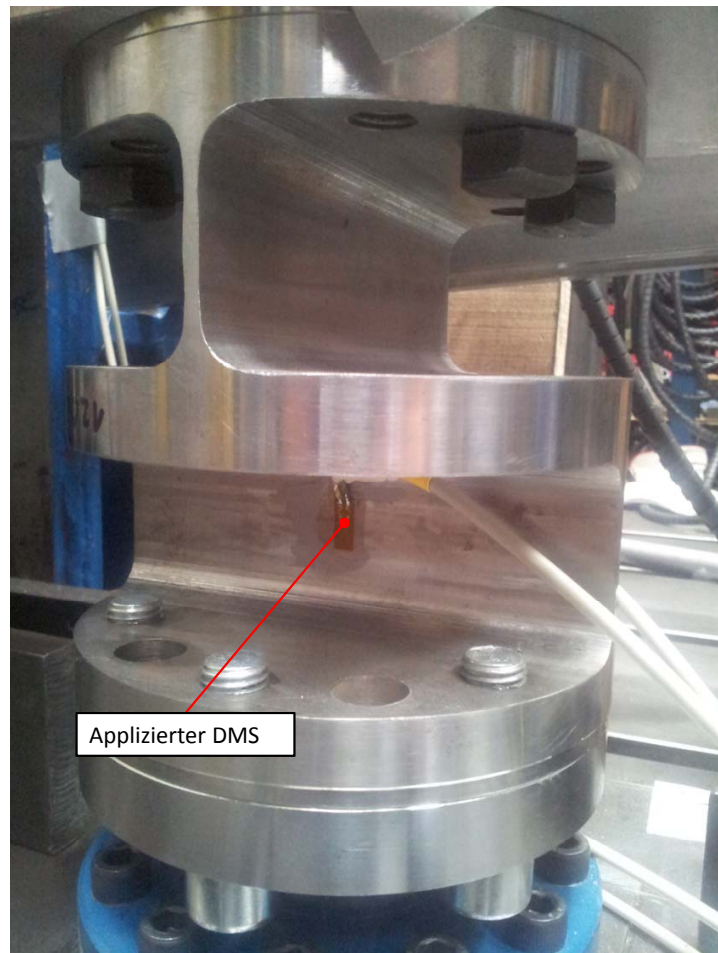


Abbildung 5.18: Festkörpergelenk mit appliziertem DMS.

Abbildung 5.19 zeigt einen Ausschnitt von 3 Zyklen eines Messschriebes bei einer Druckkraft von $F_V = 80 \text{ kN}$ und einer Auslenkung von $s_{hor} = \pm 9,72 \text{ mm}$. Die blaue und grüne Kurve in diesem Diagramm zeigen die Spannungen über die Zeit aufgetragen. Das heißt, der DMS 1, welcher die blaue Kurve darstellt, zeigt, dass durch die Vertikalkraft von $F_V = 80 \text{ kN}$ eine Druckspannung von $\sigma_{Druck} = -55 \text{ N/mm}^2$ herrscht. Durch die Auslenkung des Steges in die eine Richtung wird der Steg mit circa $\sigma_{Zug} = 90 \text{ N/mm}^2$ auf Zug belastet. Nach Erreichen des Endpunktes wird der Steg in die andere Richtung gebogen. Am anderen Endpunkt des Zyklus werden laut Dehnmessstreifen Druckspannungen von

$\sigma_{Druck} = -200 \text{ N/mm}^2$ erreicht. Der DMS 2 ist auf der gegenüberliegenden Seite angebracht und zeigt dadurch vorzeichenverkehrte Werte an.

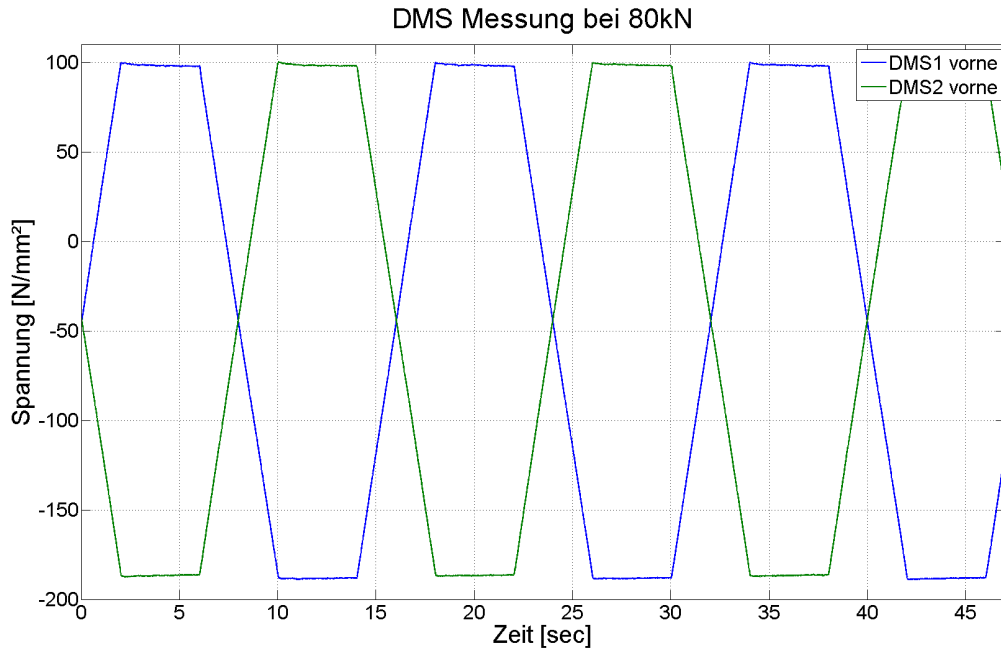


Abbildung 5.19: DMS-Messesequenz über 3 Zyklen

Bei einem idealen Verkleben der Dehnmessstreifen, das heißt, exakt gleiche Position und Richtung, sowie exakt gleiche Geometrie des Festkörpergelenks, sind die Kurven bis auf das Vorzeichen ident. Dies ist in der Praxis jedoch nicht möglich.

Vergleicht man die Werte aus der zuvor in Abschnitt 5.3 besprochenen Simulation und die Messergebnisse, so kommt man zu einer Abweichung von kleiner als 10 %, welche als sehr gering angesehen werden kann.

Damit kann die durchgeführte Simulation als verifiziert angesehen werden.

5.4 Verwendete Messtechnik am Prüfstand

5.4.1 Prüfstandsregelsystem

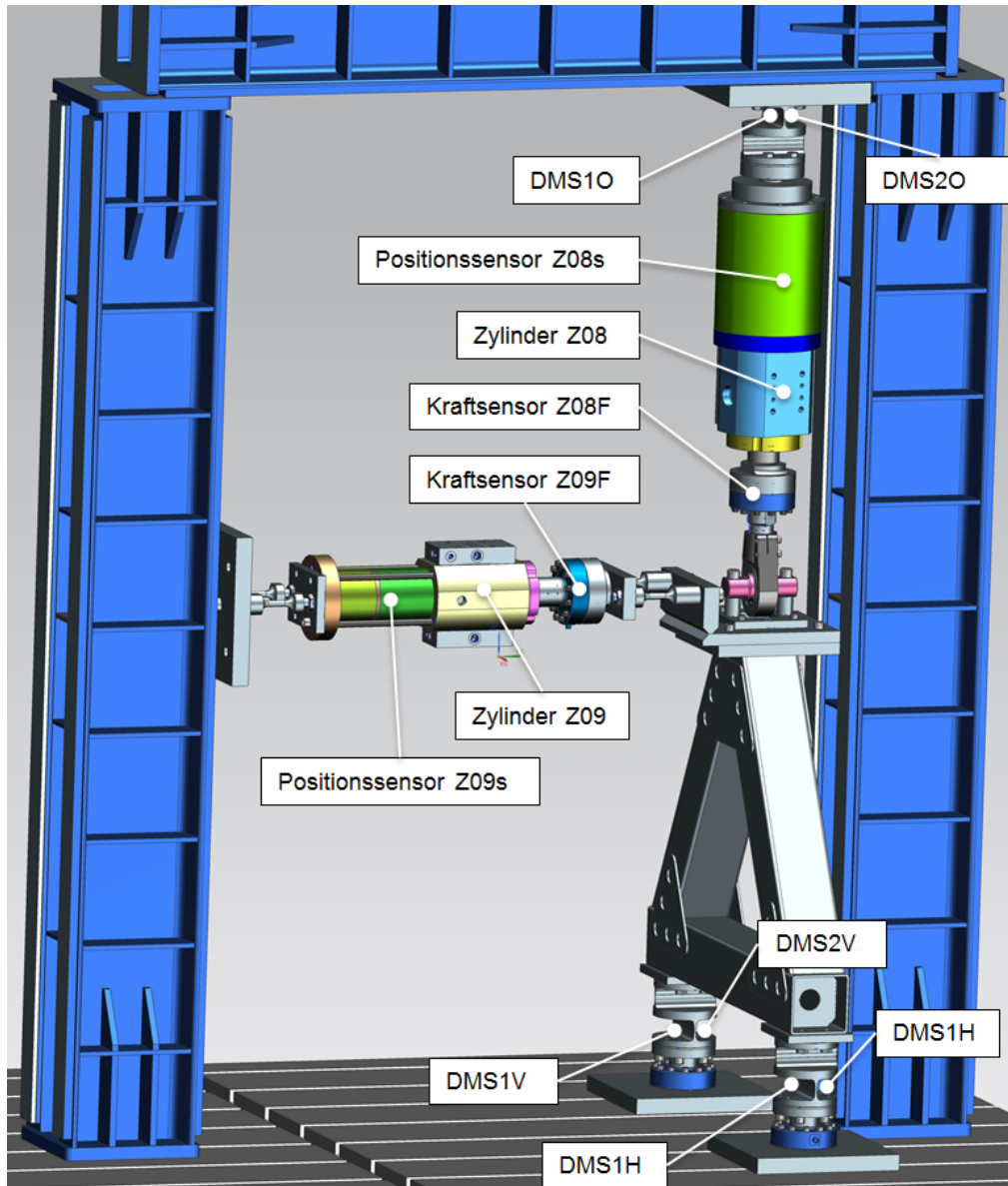


Abbildung 5.20: Reibmomentprüfstand inklusive applizierter Messtechnik.

In Abbildung 5.20 ist der gesamte Prüfstandsaufbau mit eingebautem Radialgelenkkopf GIHR80DO inklusive Beschriftung und Position der verwendeten Sensoren ersichtlich. Abbildung 5.21 zeigt schematisch den Aufbau und die Konfiguration des verwendeten Regelsystems (Kanäle 8 und 9 für Hydraulikzylinder Z08 und Z09), sowie des verwendeten Datenerfassungssystems.

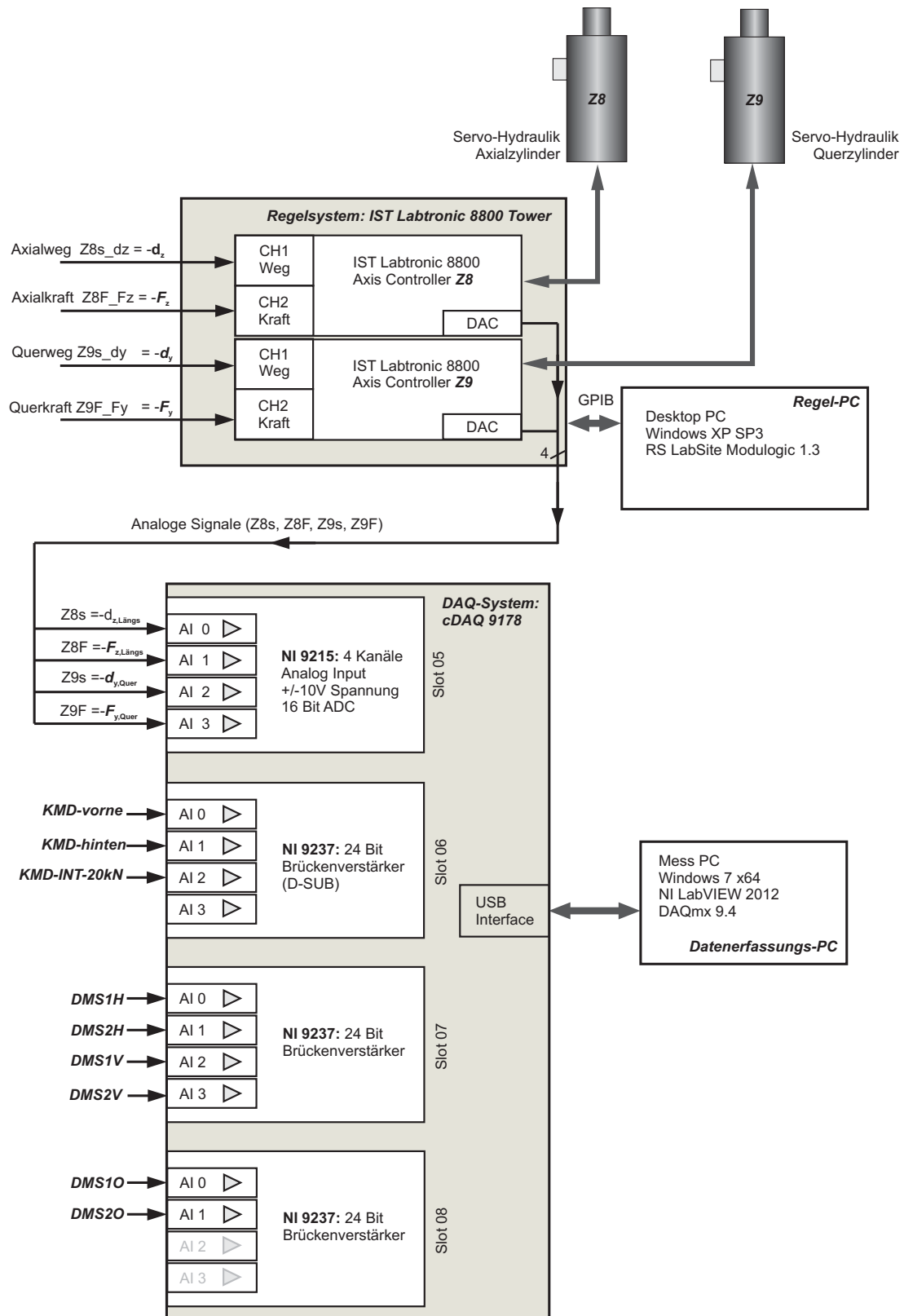


Abbildung 5.21: Schematische Darstellung des Regel- und Mess-Systems.

Die zwei verwendeten Prüfzylinder werden vom Regelsystem digital auf Kraft bzw. auf Position geregelt. Die relevanten gemessenen Zylinderpositionen und Zylinderkräfte werden als Analogsignale in ein entsprechendes Modul NI-9215 in Slot 05 der Datenerfassungseinheit cDAQ 9178 eingespeist. Wie in Abschnitt 5.4.3 näher beschrieben, werden für alle Prüfungen neben den relevanten Kraft- und Wegsignalen der Prüfzylinder synchron auch die gemessenen Spannungen mit den applizierten Dehnmessstreifen, sowie die Reaktionskräfte an den Ausleitstellen erfasst und aufgezeichnet.

Digitale Regelanlage:

Hersteller	IST Instron
Typ	IST Regelsystem Labtronic 8800
Regelbare Kanäle	max. 12, verwendet: 2
Abtastfrequenz	5 kHz
Regelstrategie	Digitaler PID-Regler für Weg/Kraft
Verwendete Regelkanäle	Zylinder Z08: Kanal 8 Zylinder Z09: Kanal 9

5.4.2 Prüfzylinder und Sensorik

Die verwendeten Prüfzylinder sind berührend gedichtete Gleichlauf-Prüfzylinder mit einer nominalen Prüfkraft von $F_{nom} = \pm 100$ kN bzw. $F_{nom} = \pm 75$ kN bei einem Öldruck von $p_{Oel} = 300$ bar. Im Inneren der Prüfzylinder sind präzise Wegaufnehmer zur Erfassung der aktuellen Zylinderposition verbaut. Die Erfassung der Zylinderkräfte, für die im Prüfbetrieb erforderliche Kraftregelung auf definierte Sollwertverläufe, passiert mittels direkt am Zylinderkolben montierten Kraftmessdosen. Die folgende Aufstellung erklärt relevante Informationen zu den verwendeten Prüfzylindern, sowie zu den angebauten Kraftmesseinrichtungen mit Details zur Sensorkalibrierung.

Servohydraulischer Prüfzylinder Z08:

Hersteller	TU Graz
Typ	ZB-100-004
Bezeichnung	Servohydraulischer Prüfzylinder, berührend gedichtet
Max. Verfahrweg	± 55 mm
Max. Prüfkraft	± 100 kN
Servoventil	Moog D761 H38
Wegsensor	MTS 110mm, verbaut im Zylinder
Regelkanal	IST-Regelsystem, Kanal 8

Kraftsensor Z08F für Prüfzylinder Z08:

Hersteller	Interface
Typ	1720ACK-20kN
Seriennummer	422259A
Messbereich	±20 kN
Messverstärker	IST Labtronic 8800: Kanal 8 CH 2

Wegsensor Z08s für Prüfzylinder Z08:

Hersteller	MTS
Typ	MTS Temposonics RD4
Messbereich	±55 mm
Messverstärker	IST Labtronic 8800: Kanal 8 CH 1

Servohydraulischer Prüfzylinder Z09:

Hersteller	TU Graz
Typ	ZB-75-004
Bezeichnung	Servohydraulischer Prüfzylinder, berührend gedichtet
Max. Verfahrweg	±55 mm
Max. Prüfkraft	±75 kN
Servoventil	Moog D761 H38
Wegsensor	WayCon 130mm, verbaut im Zylinder
Regelkanal	IST-Regelsystem, Kanal 9

Kraftsensor Z09F für Prüfzylinder Z09:

Hersteller	Interface
Typ	1228CZL-100
Seriennummer	365261A
Messbereich	±100 kN
Messverstärker	IST Labtronic 8800: Kanal 9 CH 2

Wegsensor Z09s für Prüfzylinder Z09:

Hersteller	WayCon
Typ	MSB-130-N-M
Messbereich	±130 mm
Messverstärker	IST Labtronic 8800: Kanal 9 CH 1

5.4.3 Datenerfassungssystem

Die Abbildung 5.21 zeigt das zuvor schon besprochene Übersichtsschaltbild zur Messtechnik für die Durchführung der Reibmomentprüfung von Axialgelenklagern sowie Radialgelenkköpfen. Mess-Signale werden über Verstärkermodule in ein universelles 8-Slot-Mess-Chassis des Typs NI-9178 aufgenommen. Die eingeleiteten Kräfte, vom kalibrierten Regelsystem als analoge Spannungssignale bereitgestellt, werden am Messsystem mit einem analog Input Modul synchron mit den per Brückenverstärkermodulen gemessenen Kräfte (über Kraftmessdosen) und Spannungen (über Dehnmessstreifen) erfasst und digitalisiert. Das Messsystem ist per USB-Anbindung mit einem PC verbunden, auf dem die Messapplikation inkl. Datenspeicherung läuft.

Die folgenden Aufstellungen erklären alle relevanten Parameter zum verwendeten Messsystem.

Relevante Parameter des verwendeten Mess-Chassis

Hersteller	National Instruments
Type	NI cDAQ Chassis 9178
Seriennummer	0x14841B2
Moduleinschübe	Max. 8 Slots, verwendet: Slot 05: NI 9215 4-kanaliger Analogeingang $\pm 10\text{ V}$ Slot 06: NI 9237 4-kanaliger Brückenverstärker (D-SUB) Slot 07: NI 9237 4-kanaliger Brückenverstärker Slot 08: NI 9237 4-kanaliger Brückenverstärker

Analogeingangsmodule zur Erfassung der Signale vom Regelsystem

Hersteller	National Instruments
Type	NI 9215, Analogeingangsmodule $\pm 10\text{ V}$, 16 Bit
Seriennummer	0x149562F
Slot im Chassis	05
Moduleinschübe	Max. 4, 4 verwendet bei $f_A = 2\text{ kHz}$ ai0: Z08s ai1: Z08F ai2: Z09s ai3: Z09F

Messverstärker zur Messung der zusätzlichen Kraftmessdosen

Hersteller	National Instruments
Type	NI 9237, Brückenverstärkermodul DC, 24 Bit (D-SUB)
Seriennummer	0x1638B8F
Slot im Chassis	06
Moduleinschübe	Max. 4, 4 verwendet bei $f_A = 2$ kHz ai0: KMD-vorne ai1: KMD-hinten ai2: KMD-INT-20kN

Messverstärker zur Messung der zusätzlichen Kraftmessdosen

Hersteller	National Instruments
Type	NI 9237, Brückenverstärkermodul DC, 24 Bit
Seriennummer	0x148A088
Slot im Chassis	07
Moduleinschübe	Max. 4, 4 verwendet bei $f_A = 2$ kHz ai0: DMS1H ai1: DMS2H ai2: DMS1V ai3: DMS2V

Messverstärker zur Messung der zusätzlichen Kraftmessdosen

Hersteller	National Instruments
Type	NI 9237, Brückenverstärkermodul DC, 24 Bit
Seriennummer	0x148A088
Slot im Chassis	07
Moduleinschübe	Max. 4, 4 verwendet bei $f_A = 2$ kHz ai0: DMS1o ai1: DMS2o

5.5 Prüfstandskalibrierung

Zusätzlich zu den Kalibrierungen der verwendeten Messtechnik, welche immer vor Einbau der Messtechnik in den Prüfstand geschieht bzw. vorab an einzelnen Sensoren bzw. Messverstärkern durch Kalibrierlabors durchgeführt werden, muss der verifizierte Prüfstand nach Zusammenbau kalibriert und abgeglichen werden.

- Korrekturmaßnahmen der verwendeten Messtechnik
 - Kalibrierung der Kraftmessdosens
 - Kalibrierung der Positionssensoren
- Korrekturmaßnahmen der systematischen Einflüsse
 - Korrektur von Winkelfehlern (Prüfstandsgeometrie)
 - Korrektur des Einflusses der Festkörpergelenke (Biebemomenten-Einleitung)

Die Korrekturmaßnahmen der verwendeten Messtechnik werden hier nicht weiter behandelt, da sie gesondert erfolgen und mit dem Prüfstand an sich nichts zu tun haben bzw. sämtliches Messequipment vor Beginn der Prüfung gültig kalibriert wurde.

Die Korrekturmaßnahmen der systematischen Einflüsse jedoch sind direkt vom Prüfstand abhängig. Das heißt, diese Fehler müssen nach dem Zusammenbau ermittelt werden. Die Korrektur der Winkelfehler ergibt sich aus der Geometrie des Prüfstandes, des Auslenkweges und der dazugehörigen Kraft.

Den Einfluss etwaiger Steifigkeiten oder Geometriefehler kann man am besten an einem Kraft- über Weg-Diagramm ablesen, also einer realen Hysteresekennlinie eines getesteten Lagers. Hierfür wurde ein zuvor eingelaufenes, jedoch neues, Axialgelenklager GE30AW mit $F_V = 40 \text{ kN}$ vertikal belastet und um $\psi = \pm 1^\circ$ ausgelenkt. In Abbildung 5.22 ist die dazugehörige Messung einmal ungefiltert mit $f_A = 2 \text{ kHz}$ aufgezeichnet, einmal mit $f_{\text{filt}} = 40 \text{ Hz}$ gefiltert und einmal mit $f_{\text{filt}} = 40 \text{ Hz}$ gefiltert und berichtigt zu sehen. Wenn im gesamten Prüfstand keine zusätzlichen Einflüsse, außer der Reibung des Prüflings, auftreten würden, wäre die Kurve von Anfang an horizontal und keine Kompensation wäre nötig. Die Kraft wäre, mit Ausnahme zu Beginn jeder Bewegung, über den gesamten Auslenkweg konstant. Das bedeutet, dass die negative Steigung, die die Kurve besitzt, aus Einflüssen wie Winkelfehler und Steifigkeit des Prüfstands resultiert. Somit kann angenommen werden, dass alle nachfolgenden Gelenklager bei dieser Last die gleiche Steigung besitzen. Da sowohl der Winkel, als auch die Steifigkeit von der Axialbelastung abhängig ist, wurde die Korrektur der Messungen in zwei Teilschritte aufgeteilt.

- Geometrieinfluss: Einfluss, welcher durch einen Winkelfehler bei der Auslenkung entsteht.
- Steifigkeitseinfluss: Einfluss, welcher durch die Steifigkeit, der im Prüfstand verbauten Festkörpergelenke entsteht.

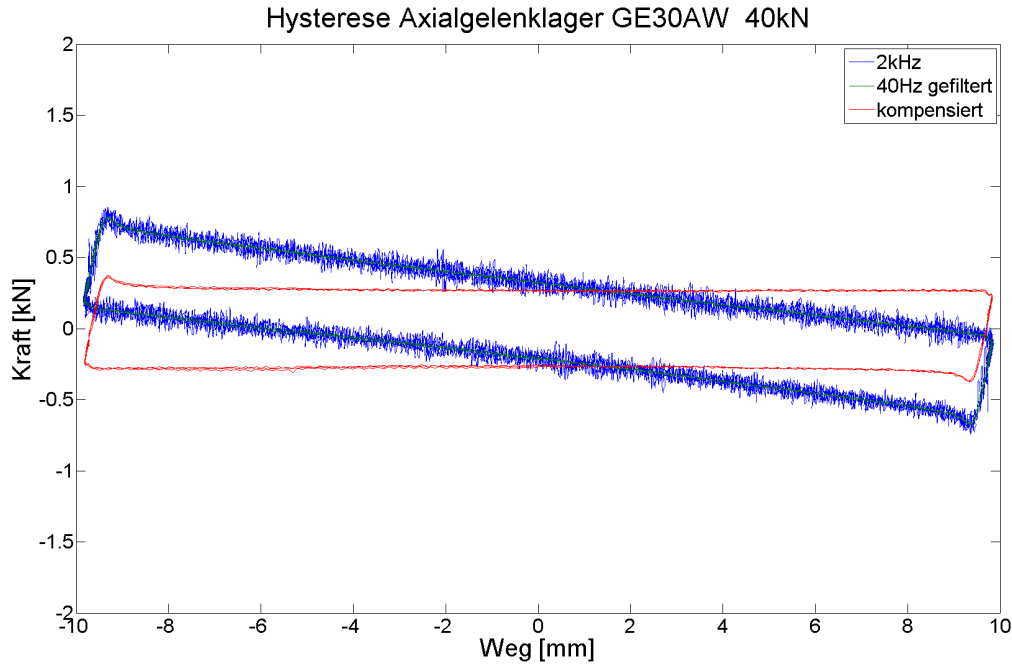


Abbildung 5.22: Kalibriermessung mit einem Axialgelenklager GE30AW bei einer Vertikalbelastung von 40 kN.

Der Geometrieinfluss wird errechnet mit:

$$F_H = F_V \cdot \sin(\varphi) \quad (5.1)$$

Der Steifigkeitseinfluss wurde wie folgt ermittelt: Mit dem in den Prüfstand eingebauten Lager wurden Prüfungen bei verschiedenen Vertikalbelastungen durchgeführt ($F_V = 20 \text{ kN}$, $F_V = 40 \text{ kN}$, $F_V = 60 \text{ kN}$ und $F_V = 80 \text{ kN}$).

Bei der Auswertung dieser Versuche wurde dann der Geometriefehler kompensiert. Die verbleibende Steigung der Hysterese spiegelt nun direkt den Einfluss der Festkörpergelenke auf die Hysterese wider. Diese Steigung wurde aus den Messdaten für jede der vier Zylinderkräfte F_V errechnet und in Abbildung 5.23 eingetragen. Dieses Diagramm, welches den Namen Steifigkeitsanalyse trägt, beinhaltet nun die Steifigkeit des Gesamtprüfstandes über der Vertikalkraft des Zylinders Z08.

In Abbildung 5.23 ist der Zusammenhang zwischen Steifigkeit des Prüfstandes und Vertikalkraft dargestellt. Eine Regressionsgerade wurde durch diese Punkte errechnet und die Funktion der Kurve wurde als Basis der Korrekturmaßnahmen für die Steifigkeit der Festkörpergelenke herangezogen.

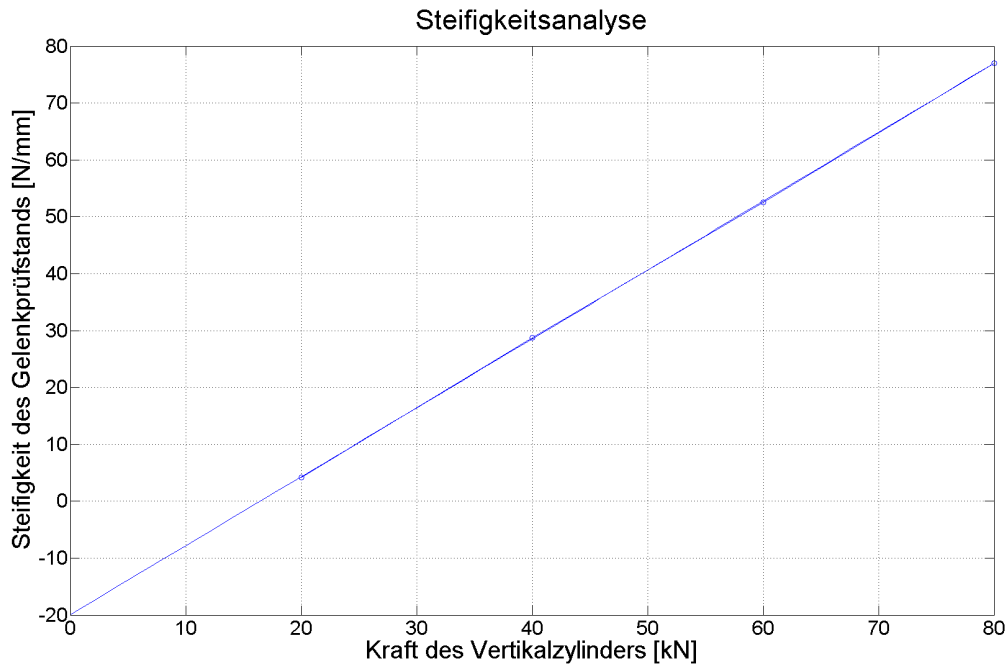


Abbildung 5.23: Steifigkeitskurve des Gelenkprüfstands bei unterschiedlicher Vertikalbelastung.

5.6 Verifikation des Prüfstands

Nach der Inbetriebnahme und der Kalibrierung des Prüfstands wurden Kontrollmessungen durchgeführt. Hierzu wurde dasselbe Axialgelenklager GE30AW, welches für die Kalibrierung verwendet wurde, eingebaut und mit $F_V = -40$ kN belastet. Unter dieser Vertikallast von $F_V = -40$ kN wurden des weiteren drei Messzyklen geprüft. In Abbildung 5.24 sind die Signalverläufe Kraft über Zeit der eingeleiteten Vertikalkraft und der beiden ausgeleiteten Vertikalkräfte abgebildet. Um nun eine erste Kontrolle der Signale durchzuführen, wurde die eingeleitete Vertikalkraft (Abbildung 5.24) mit den zwei ausgeleiteten Vertikalkräften (Abbildung 5.24) verglichen. Hierzu wurden die zwei ausgeleiteten Kräfte summiert und von der eingeleiteten Kraft subtrahiert.

Das Ergebnis dieser Gegenüberstellung, in Prozent der Abweichung aufgetragen über die Zeit, ist in Abbildung 5.25 zu sehen. Um ein besseres Verständnis dieses Diagrammes zu fördern, wurde der Auslenkweg des Lagers in das Diagramm eingezeichnet. Das gewählte Wegsignal wird in Abschnitt 6.2 genauer beschrieben. Die Trapezform der Abweichung (Abbildung 5.25) kommt zustande, weil die ausgeleiteten Kraftmessdosen feststehend montiert sind und die Kraftmessdose der Einleitung sich mit der Auslenkung des Horizontalzylinders mitbewegt. Somit sieht man in dieser Kurve einen Winkelfehler, welcher in dieser Darstellung nicht kompensiert wurde. Durch die Haftreibung, die man überwinden muss, um das eingebaute Lager in Bewegung zu versetzen, kommt es kurzzeitig zu einem erhöhten Kraftaufwand, welcher sich in den ersichtlichen Signalspitzen der Kurve widerspiegelt.

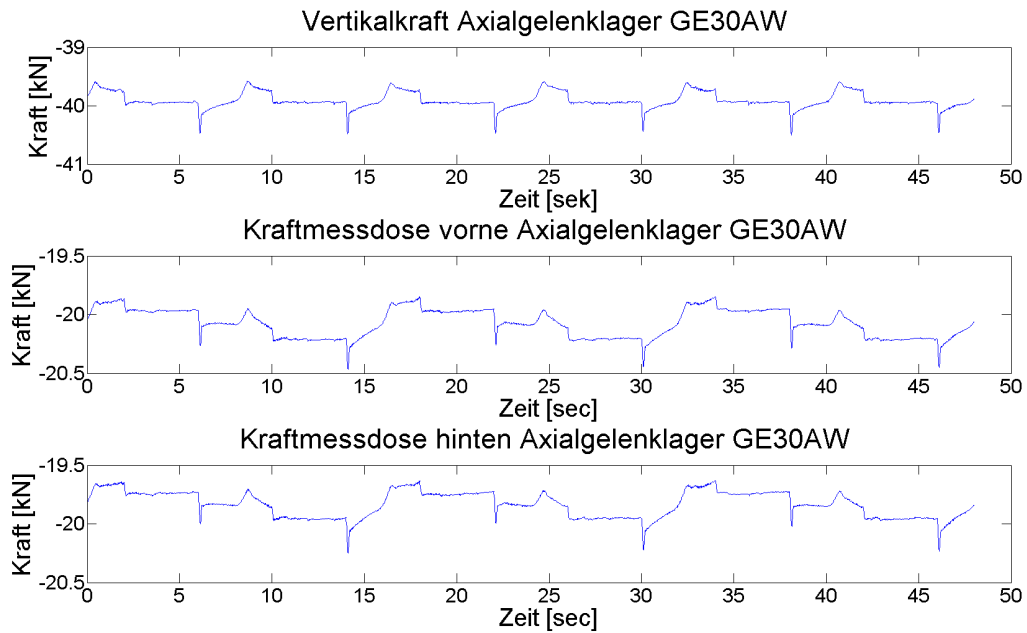


Abbildung 5.24: Eingeleitete und ausgeleitete Kräfte bei Vertikalbelastung $F_V = -40$ kN.

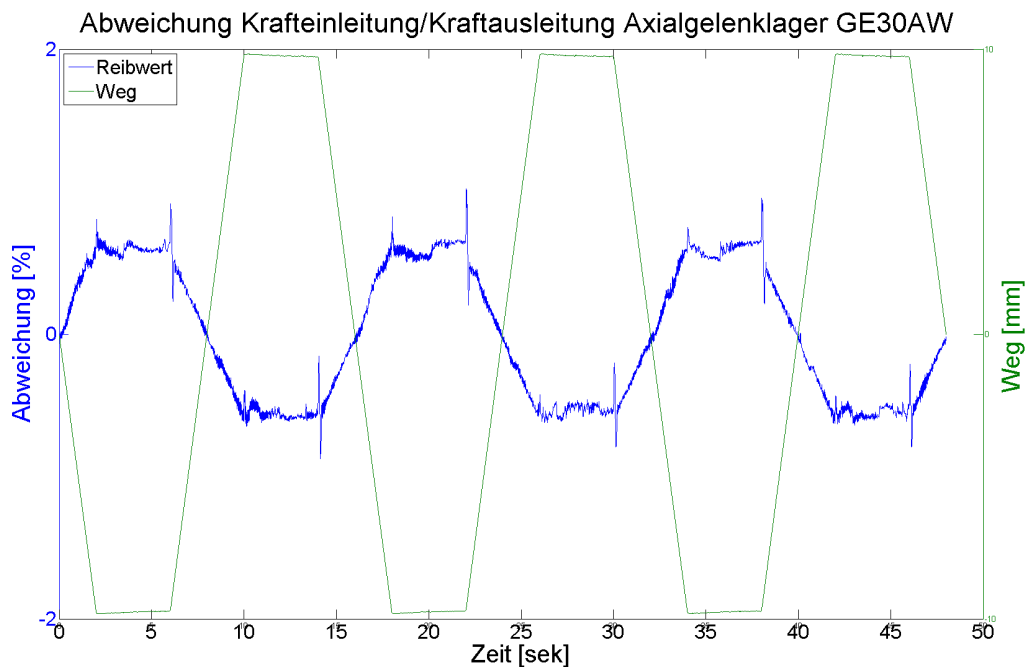


Abbildung 5.25: Prozentuelle Abweichung der eingeleiteten und ausgeleiteten Vertikalkraft im Prüfstand bei einer Vertikalbelastung von $F_V = -40$ kN.

Kapitel 6

Charakterisierung von Gelenklagern

Im folgenden Kapitel 6 wird auf die für die Prüfungen verwendeten Prüflinge, das Prüfprogramm, eine typische Auswertung eines Ergebnisses, sowie die Ergebnisse eingegangen und erklärt.

6.1 Prüflinge

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden verschiedene Gelenklagertypen als Prüflinge ausgewählt und einer Prüfung unterzogen. Diese Prüflinge waren vom Typ Axialgelenklager (Abbildung 6.1) und vom Typ Radialgelenkkopf (Abbildung 6.2).

Unabhängig vom verwendeten Typ oder der Lager-Größe geben alle bekannten Lagerhersteller ähnliche Reibwerte für sphärische Lager an. In Tabelle 6.1 können diese Reibkoeffizienten eingesehen werden.

Gleitpaarung	Reibungsfaktor	
	min.	max.
Stahl/Stahl	0,08	0,22
Stahl/Bronze	0,1	0,25
Hartchrom/PTFE-Verbundwerkstoff	0,05	0,2
Stahl/PTFE-Folie	0,05	0,2
Hartchrom/ELGOGLIDE®	0,02	0,2

Tabelle 6.1: Tabelle der Reibkoeffizienten laut Hersteller, Quelle: [1, Seite 26]

6.1.1 Axialgelenklager

Axialgelenklager werden ausschließlich wartungsfrei verwendet und sind ausschließlich für Druck-Schwellbelastungen zu verwenden. Ihre große sphärische Fläche gegenüber anderen Lagertypen eignet sich sehr gut für große Lasten.

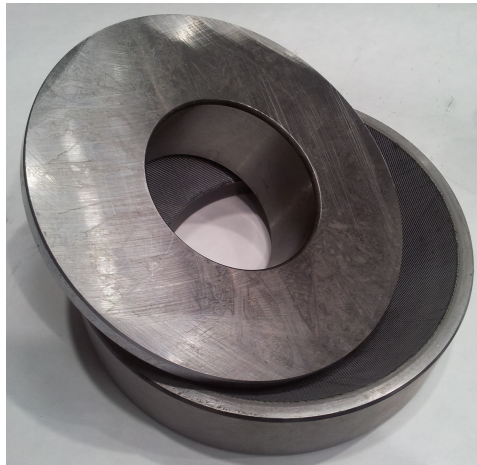


Abbildung 6.1: Exemplarische Darstellung eines Axialgelenklagers (Typ GE 70 AW)

Mit dem realisierten Prüfstand wurden die folgenden Lagertypen geprüft:

- GE30AW
- GE70AW

6.1.2 Radialgelenkkopf

Radialgelenkköpfe sind Radialgelenklager, welche in einen Kopf eingepresst werden. Damit erleichtert sich eine Montage an diversen Bauteilen. Diese Köpfe gibt es in verschiedensten Ausführungen. Sie können an eine Vorrichtung angeschweißt oder angeschraubt werden. Für die schweißbare Ausführung ist der Kopf mit einer Schweißnahtvorbereitung ausgestattet. Für die schraubbare Ausführung hat der Kopf ein Innen- oder ein Außengewinde, je nachdem was benötigt wird. Weiters ist bei Radialgelenkköpfen zwischen wartungspflichtigen und wartungsfreien Lagern zu unterscheiden (siehe Kapitel 4). In Abbildung 6.2 sind zwei unterschiedliche Ausführungen dieser Lager zu sehen. Tabelle 6.2 zeigt das bei diesen Lagern auftretende Lagerspiel laut Hersteller.

Am Prüfstand wurden folgende Lager geprüft:

- GAR40UK



Abbildung 6.2: Exemplarische Darstellung zweier Radialgelenkköpfe, Quelle: [4] (links), [5] (rechts).

Baureihe	Radiale Lagerluft in μm					
	C2		CN		C3	
Bohrung von – bis [mm]	min.	max.	min.	max.	min.	max.
6 - 12	8	32	32	68	68	104
15 – 20	10	40	40	82	82	124
25 – 35	12	50	50	100	100	150
40 – 60	15	60	60	120	120	180
63 – 90	18	72	72	142	142	212

Tabelle 6.2: Tabelle der wichtigsten Lagerspiele für Radialgelenkköpfe laut Hersteller, Quelle: [1, Seite 31]

6.2 Prüfprogramm zur Charakterisierung von Gelenklagern

Das Prüfprogramm wurde so gewählt, dass es einerseits alle Parametervariationen, welche gefordert sind enthält und andererseits den charakteristisch aussagekräftigsten Wertebereich beinhaltet. Bei einer konstanten Vertikallast (geregelter Zylinder Z08) wurde als Führungssignal für den Horizontalzylinder eine Trapez-Rampe gewählt, um Bereiche mit konstanter Auslenkgeschwindigkeit zu haben.

Für jeden Lagertyp (unter verschiedenen Bedingungen und Lastzyklen) wurden 21 Prüfläufe mit unterschiedlichen Belastungen bzw. Auslenkungen durchgeführt. Diese Prüfläufe sind in der folgenden Tabelle 6.3 abgebildet.

lauf.Nr.	Vertikalbelastung Z08F in kN	Horizontalauslenkung Z09s in mm	Geschwindigkeit v in mm/sek	Verweilzeit in sek
1	-10	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	4,86	4
2	-20	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	4,86	4
3	-30	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	4,86	4
4	-40	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	4,86	4
5	-50	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	4,86	4
6	-60	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	4,86	4
7	-70	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	4,86	4
8	-80	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	4,86	4
9	-40	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	1,46	4
10	-40	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	2,43	4
11	-40	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	3,89	4
12	-40	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	5,67	4
13	-40	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	6,48	4
14	-40	$\pm 9,72 \hat{=} \pm 1^\circ$	7,29	4
15	-40	$\pm 0,73 \hat{=} \pm 0,075^\circ$	4,86	4
16	-40	$\pm 1,46 \hat{=} \pm 0,15^\circ$	4,86	4
17	-40	$\pm 2,43 \hat{=} \pm 0,25^\circ$	4,86	4
18	-40	$\pm 4,86 \hat{=} \pm 0,5^\circ$	4,86	4
19	-40	$\pm 6,32 \hat{=} \pm 0,65^\circ$	4,86	4
20	-40	$\pm 7,29 \hat{=} \pm 0,75^\circ$	4,86	4
21	-40	$\pm 8,75 \hat{=} \pm 0,9^\circ$	4,86	4

Tabelle 6.3: Tabelle des Prüfprogramms

Das trapezförmige Führungssignal für die Positionsregelung des Horizontalzylinders ist in Abbildung 6.3 ersichtlich. Hierbei stellt der Bereich 1 die erste Auslenkung in positive

Richtung bis zum positiven Totpunkt der Kurve dar, der Bereich 2 zeigt die 4 Sekunden andauernde Verweilzeit am positiven Totpunkt, der Bereich 3 die Bewegung vom positiven Totpunkt zum negativen Totpunkt, der Bereich 4 wiederum eine 4 Sekunden andauernde Verweilzeit am negativen Totpunkt und der Bereich 5 die Bewegung vom negativen Totpunkt zum Ausgangspunkt.

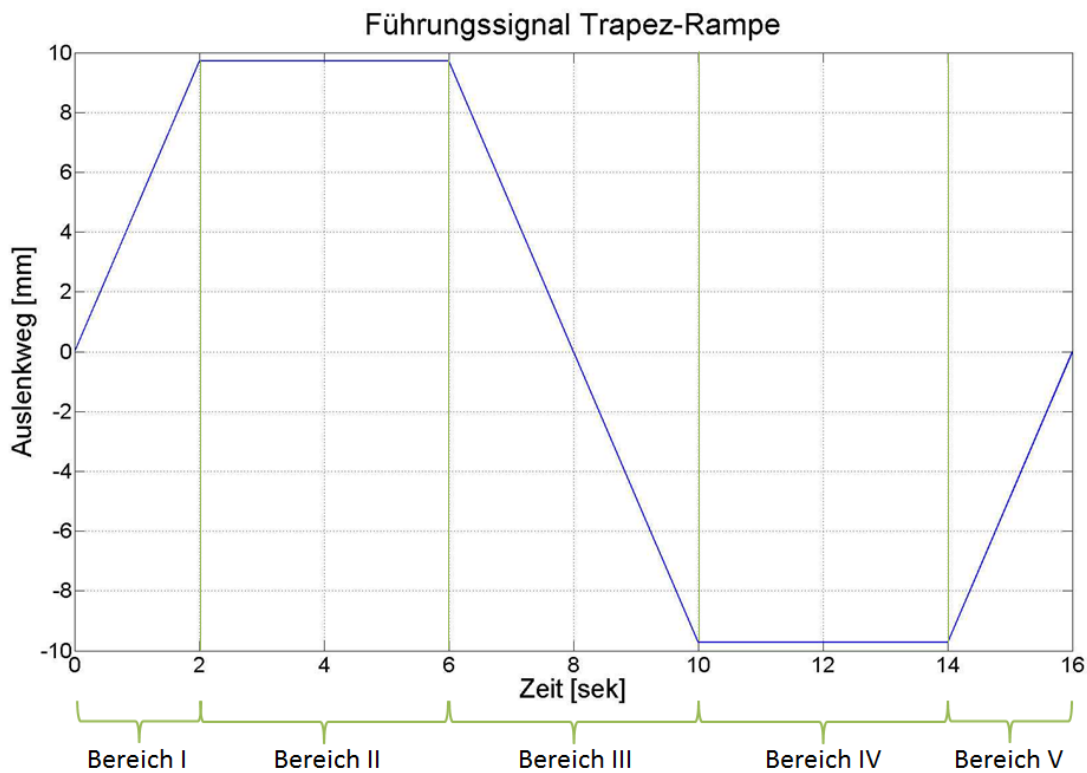


Abbildung 6.3: Verwendetes Führungssignal für die Prüfläufe zur Gelenk-Charakterisierung.

6.3 Auswertung einer Versuchsserie

Alle Auswertungen der aufgenommenen Messsignale wurden in Matlab vorgenommen.

Die in diesem Abschnitt dargestellten Diagramme wurden mit folgenden Parametern aufgezeichnet:

- Vertikalbelastung $Z08F = -40 \text{ kN}$
- Geschwindigkeit $v = 4,86 \text{ mm/sek}$
- Auslenkweg $Z09s = \pm 9,72 \text{ mm} \hat{=} \pm 1^\circ$
- Verweilzeit $t = 4 \text{ sek}$

Die für die Auswertung relevanten Messsignale sind in Abbildung 6.4 ungefiltert und ohne Kerrektur (siehe Abschnitt 5.5) dargestellt. Hierbei handelt es sich um die Signale der eingeleiteten Vertikalkraft, um den Weg des Vertikalzylinders während der Auslenkung, um die dabei auftretenden Horizontalkraft und um den absolvierten Horizontalweg jeweils über die Zeit aufgetragen.

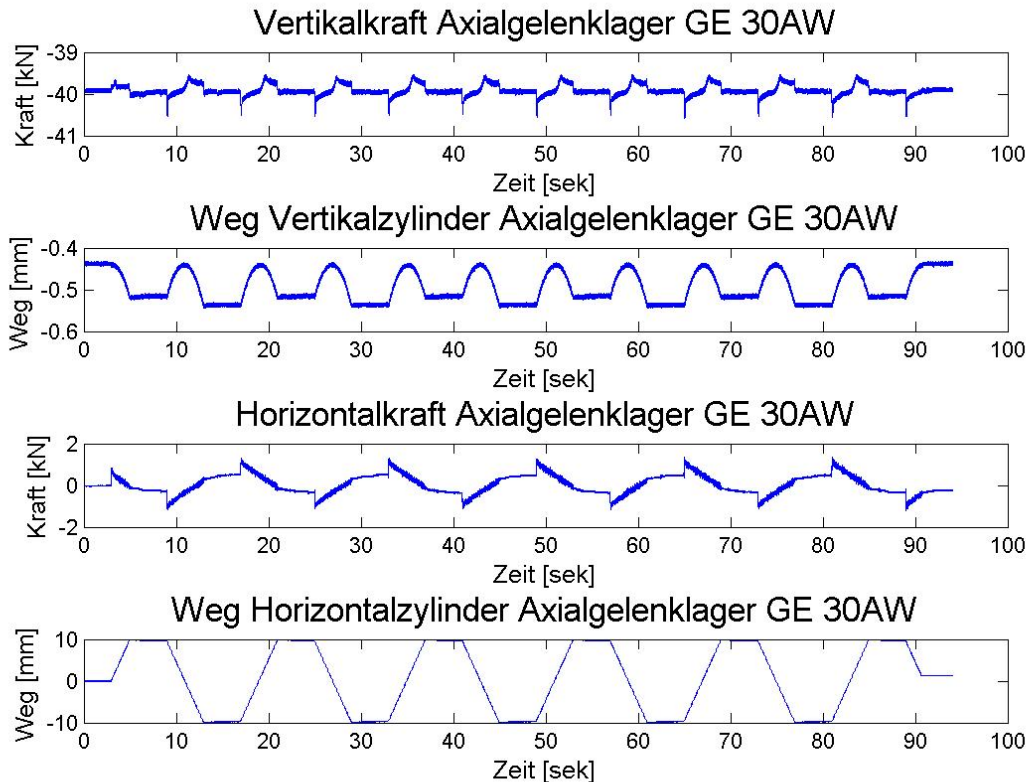


Abbildung 6.4: Weg und Kraft des Vertikal- und Horizontalzylinders bei einer Vertikalbelastung $F_V = -40$ kN.

Für die Auswertung der Messsignale werden alle Signale mit einem Tiefpass (FIR, 100 Punkte, Grenzfrequenz 40 Hz) auf 40 Hz gefiltert und danach die Korrekturrechnungen (Winkelfehler des Prüfstands und Einfluss der Festkörpergelenke) vorgenommen. Um die Reibarbeit in einem Diagramm bestmöglichst darzustellen, verwendet man die Darstellung der Reibkraft über dem Verfahrweg. Dadurch kann die sogenannte Hysteresekurve des jeweiligen Gelenkes für die aufgebrachte Belastung visualisiert werden. Die von der Hysteresekurve eingeschlossene Kurve entspricht dabei der Reibarbeit.

Abbildung 6.6 stellt solch eine Hysterese dar. In dieser Abbildung sind drei Hysteresen desselben Prüflaufs ersichtlich. In Blau ist das mit $f_A = 2$ kHz aufgezeichnete Messsignal als Hysterese aufgetragen. Die Grün gefärbte Kurve stellt das mit $f_{fit} = 40$ Hz tiefpassgefilterte Signal, die rote Kurve das winkelfehler- und steifigkeitsberichtigte Signal dar.

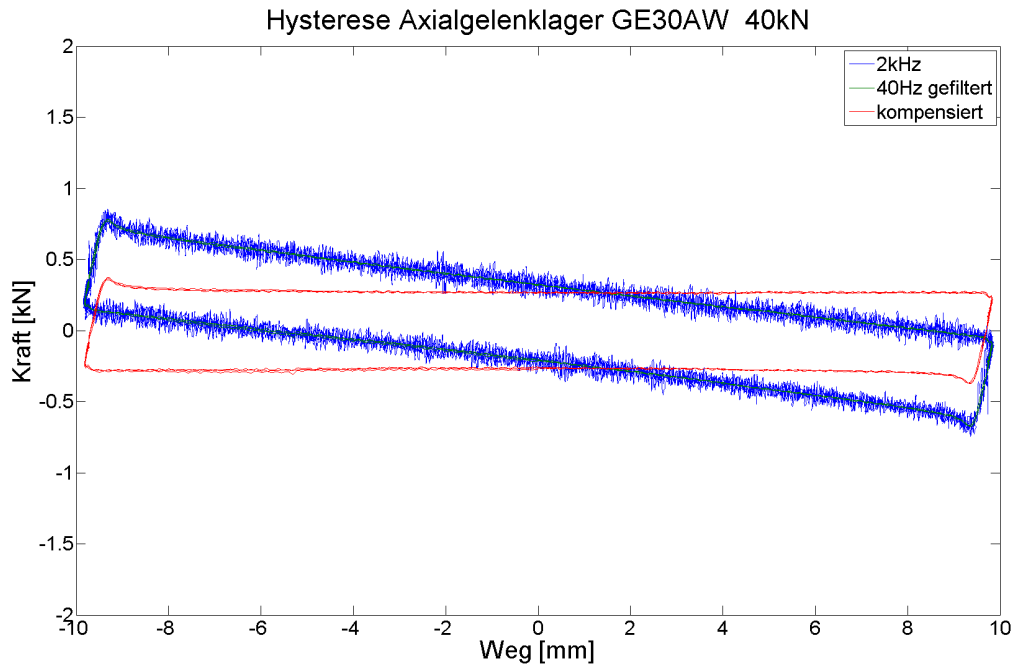


Abbildung 6.5: Kraft-Weg-Diagramm des Axialgelenklagers GE30AW bei einer Vertikalbelastung von $F_V = -40$ kN. Blau: ungefiltertes Messsignal (nicht berichtigt); Grün: gefiltertes Messsignal (nicht berichtigt); Rot: gefiltertes und berichtigtes Messsignal, Ergebnis.

In Abbildung 6.6 ist der Verlauf des aus dem Versuch ermittelten Reibkoeffizienten über die Zeit aufgetragen dargestellt. Die Berechnung des jeweiligen maximalen Reibkoeffizienten wird wie folgt gemacht:

$$F_R = F_N \cdot \mu$$

$$\mu = F_R / F_N$$

Abbildung 6.6 zeigt den Reibwertverlauf über die Zeit für drei volle Messzyklen der zuvor beschriebenen Prüfung. Die grüne Kurve in diesem Diagramm ist der Weg des Horizontalzylinders und die blaue Kurve der errechnete Reibwert. Die ausgeprägten Spitzen dieser Kurve sind dabei dem Haftreibwert, welcher beim Losbrechen des Lagers überwunden werden muss. Danach bricht der Reibwert bis zu einem sich einstellenden konstanten Gleitreibwert ein. Wenn der Horizontalzylinder an der Endposition angelangt ist, gibt es eine 4 Sekunden lange Verweilzeit an dieser Position. Während dieser Verweilzeit bauen sich langsam, die durch die Relativbewegungen entstandenen Verspannungen der beiden Gleitflächen, ab, bevor das Lager wieder in die andere Richtung ausgelenkt wird.

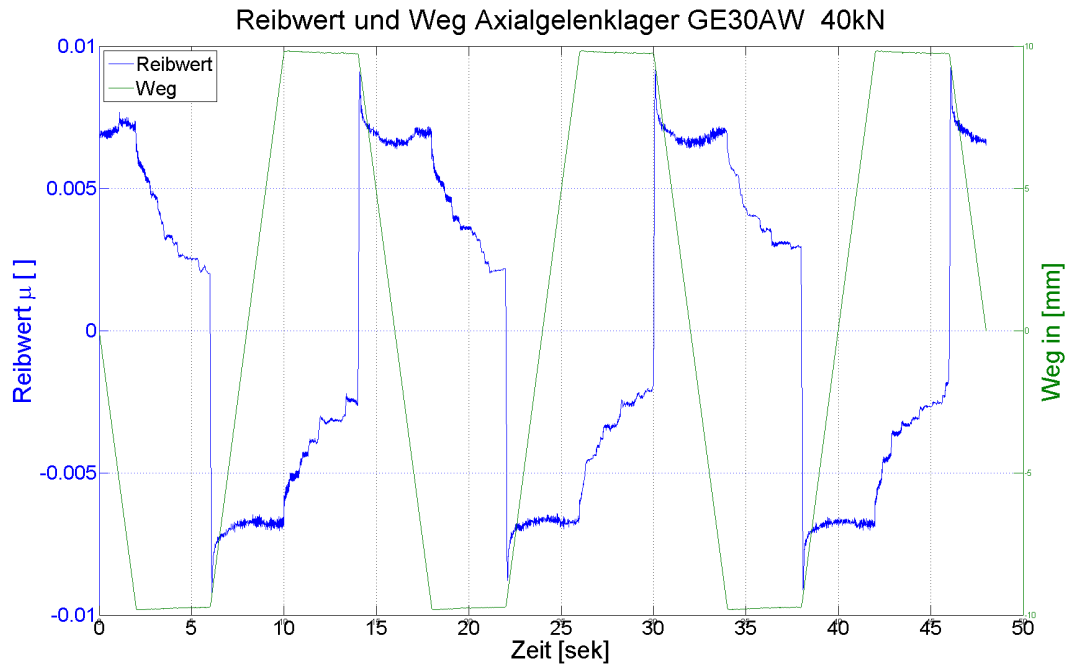


Abbildung 6.6: Reibwert und Weg eines Axialgelenklagers GE30AW bei einer Vertikalbelastung von $F_{zV} = -40$ kN.

6.4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt 6.4 werden nun die verschiedenen Ergebnisse der unterschiedlichen Parametervariationen und Lagertypen vorgestellt.

6.4.1 Axialgelenklager GE30AW

Das Axialgelenklager GE30AW wurde laut des zuvor besprochenen Prüfprogramms (Tabelle 6.3) geprüft. Vor den Prüfläufen zur Lagercharakterisierung wurde das Lager über 10000 Lastzyklen dynamisch belastet (Einlaufen des Lagers). Abbildung 6.7 zeigt die Hysterese dieses Lagers bei einer Vertikalbelastung von $F_V = -40$ kN, eines Auslenkwinkels von $\psi = \pm 1^\circ \hat{=} Z09s = \pm 9,72$ mm und einer Geschwindigkeit von $v = 4,86$ mm/sek.

In den beiden Umkehrpunkten der Auslenkung (Bereich zwischen -10 mm... -8 mm und -10 mm... -8 mm) tritt eine zur restlichen Kraft erhöhte Kraft auf. Dies ist auf die Haftreibung zurückzuführen, welche zuerst überwunden werden muss, um im Anschluss bei konstanter Gleitgeschwindigkeit und Gleitreibung eine konstante Kraft aufzuweisen. Die eingeschlossene Fläche innerhalb der Hysterese-Kurve entspricht der Reibarbeit W_R , welche für dieses Lager unter diesen Bedingungen für einen Zyklus $W_R = 16,4$ J beträgt.

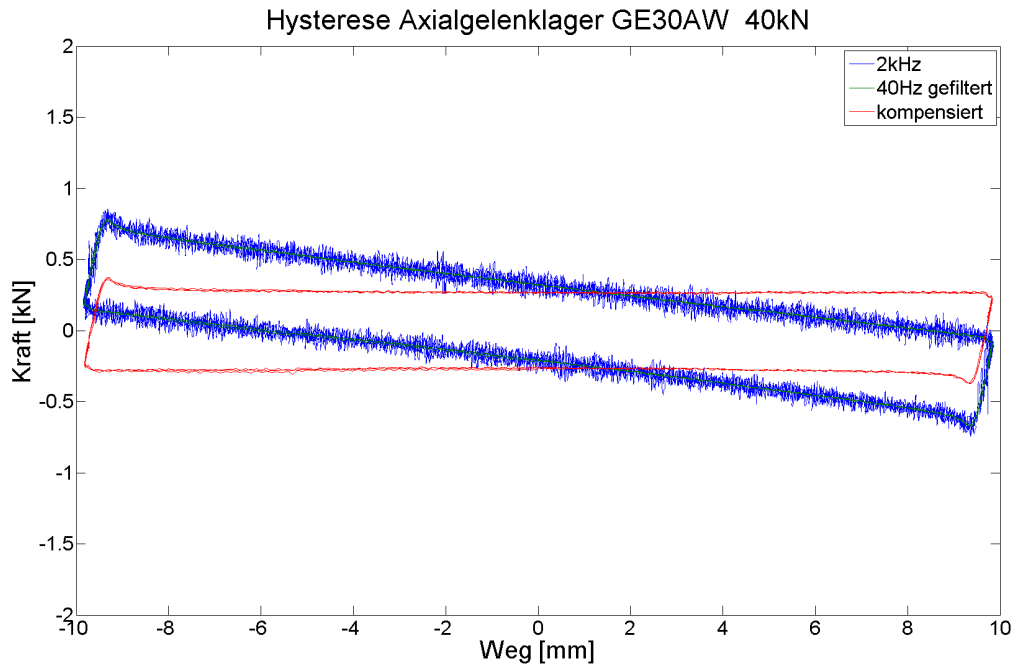


Abbildung 6.7: Hysterese Axialgelenklager GE30AW, $F_V = -40$ kN, $Z09s = \pm 9,72$ mm, $v = 4,86$ mm/sek.

Den Zeitverlauf des ausgewählten Reibwertes über mehrere Prüfzyklen zeigt die folgende Abbildung 6.8. Dieses Diagramm stellt wiederum den Reibkoeffizienten und den Auslenkweg über die Zeit dar. Die Spitzen zu Beginn jeder Horizontalbewegung sind, wie schon zuvor mehrmals erwähnt, im Vergleich zur Gleitreibung erhöht.

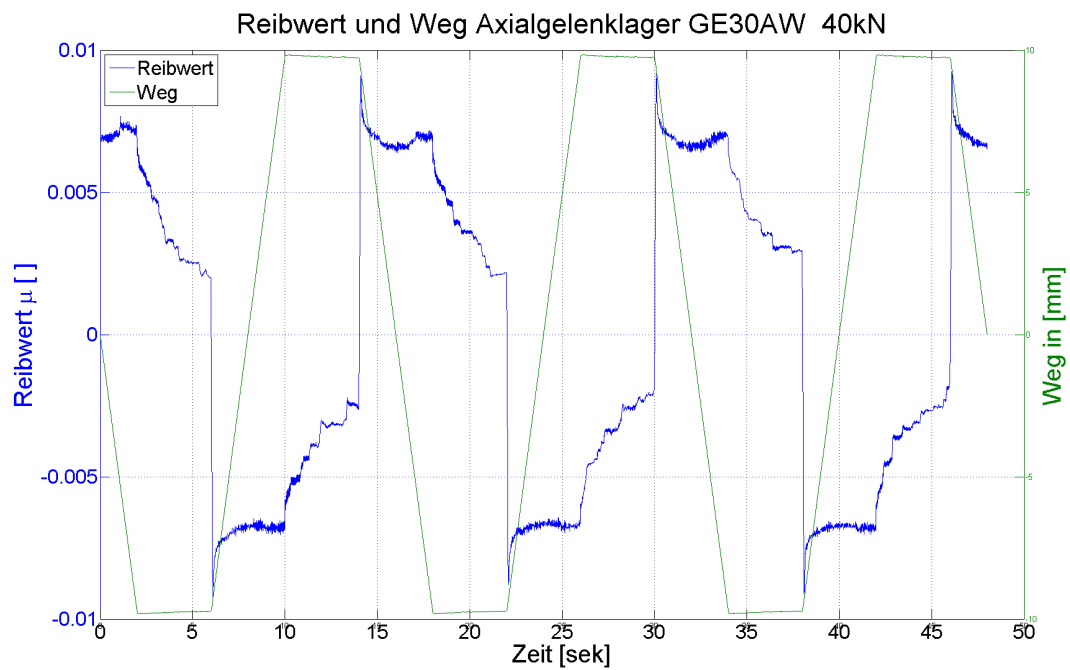


Abbildung 6.8: Reibwert und Weg eines Axialgelenklagers GE30AW bei einer Vertikalbelastung von $F_V = -40$ kN.

Die für dieses Lager ermittelten Reibkoeffizienten ergeben sich zu:

- Haftreibungskoeffizient $\mu_H = 0,015$
- Gleitreibungskoeffizient $\mu_G = 0,01$
- Reibarbeit $W_R = 16,4$ J

Variation der Belastung

Für eine Variation der Vertikalbelastung des Lagers laut Prüftabelle 6.3 ergeben sich die Graphen 6.9 und 6.10 für den ermittelten Reibwert (Haftreibung) und die Hysteresekurve.

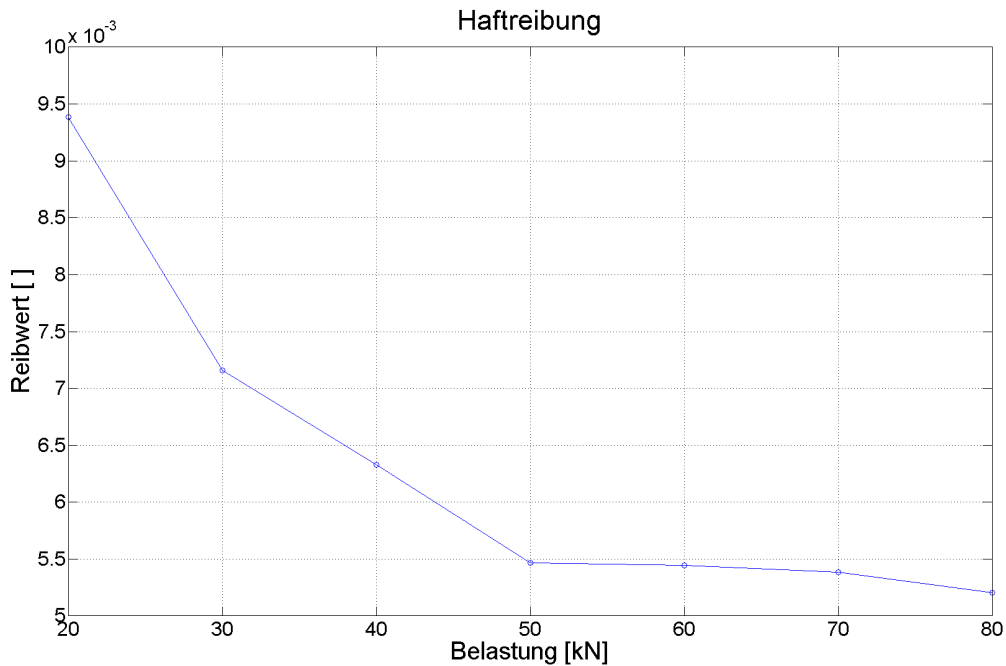


Abbildung 6.9: Darstellung des Haftreibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Axialbelastung eines Axialgelenklagers GE30AW.

In Abbildung 6.9 sind die unterschiedlichen Haftreibwerte in Abhängigkeit der Vertikalbelastung F_V aufgetragen. Hierbei ist zu erkennen, dass der Reibwert mit ansteigender Vertikalbelastung F_V niedriger wird. Dies lässt sich durch die Tatsache erklären, dass es bei höherer Belastung zu einer Vergleichmäßigung der Oberfläche durch elastische Verformung kommt und somit die Oberflächen der Lagerschalen besser aneinander abrutschen können. Dies ist jedoch nur bis zu einer kritischen Flächenpressung der Fall. Kommt es zu einer größeren Belastung, als diese kritische Flächenpressung, so wird die Oberfläche plastisch verformt und der Reibwert steigt. Das bedeutet auch, dass sich das Lager für den Einsatz in Ermüdungsversuchen besser eignet je näher das Lager an der maximalen Belastbarkeit liegt. Daraus wiederum lässt sich ableiten, dass Lager für Ermüdungsversuche so ausgelegt werden sollten, dass sie nur über die jeweilige Prüfdauer eingesetzt werden sollten.

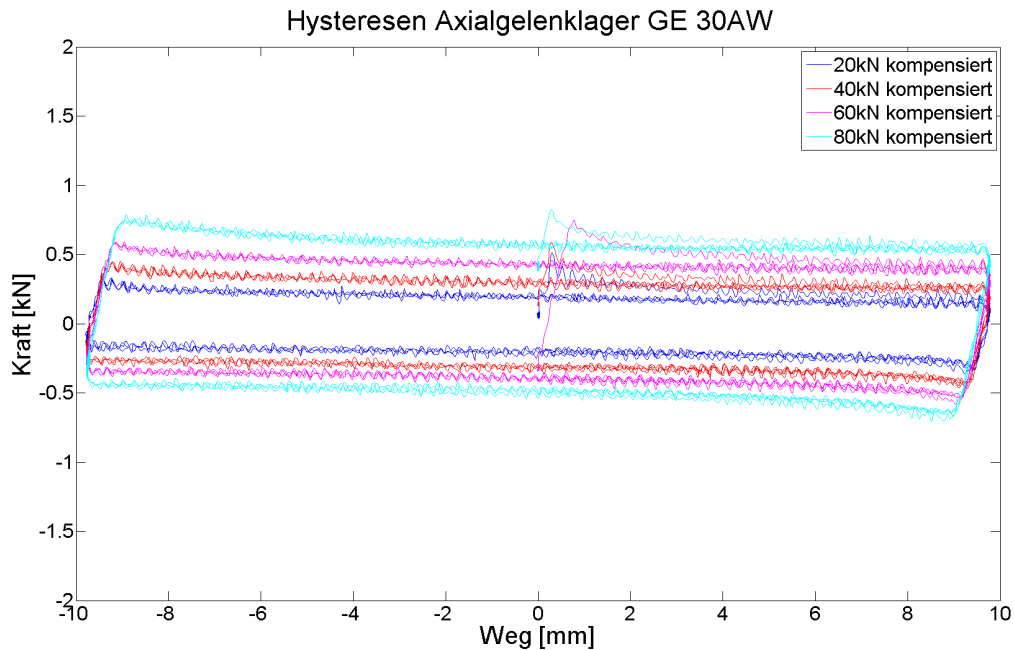


Abbildung 6.10: Darstellung von vier Hysteresen, welche mit unterschiedlicher Axialbelastung geprüft wurden. Blau: $F_V = 20 \text{ kN}$; Rot: $F_V = 40 \text{ kN}$; Pink: $F_V = 60 \text{ kN}$; Türkis: $F_V = 80 \text{ kN}$.

Abbildung 6.10 zeigt exemplarisch drei Hysterese-Kurven für unterschiedliche Vertikalbelastungen von $F_V = -20 \text{ kN}$, $F_V = -40 \text{ kN}$, $F_V = -60 \text{ kN}$ und $F_V = -80 \text{ kN}$. Bei größer werdender Vertikalbelastung wird im Gegenzug zum Reibwert die Hysterese größer. Das heißt, die Reibarbeit wird mit größer werdender Vertikalbelastung des Lagers größer. Dies ist durch eine größer werdende Reibkraft F_R bei größer werdender Normalkraft F_V zu erklären ($F_R = F_V \cdot \mu$).

Variation der Geschwindigkeit

Für die Variation der Verfahrensgeschwindigkeit der Lagerschalen des Axialgelenklagers GE30AW ergibt sich folgende Kurve (siehe Abbildung 6.11). In dieser Kurve (Abbildung 6.11) ist ein leichter Anstieg des Reibkoeffizienten mit zunehmender Geschwindigkeit zu erkennen. Betrachtet man jedoch die Achsenkalibrierung, so befindet sich dieser Anstieg des Reibwertes im Promillebereich und ist für die Betrachtung von wartungsfreien Gelenklagern in dieser Anwendung nicht von Bedeutung.

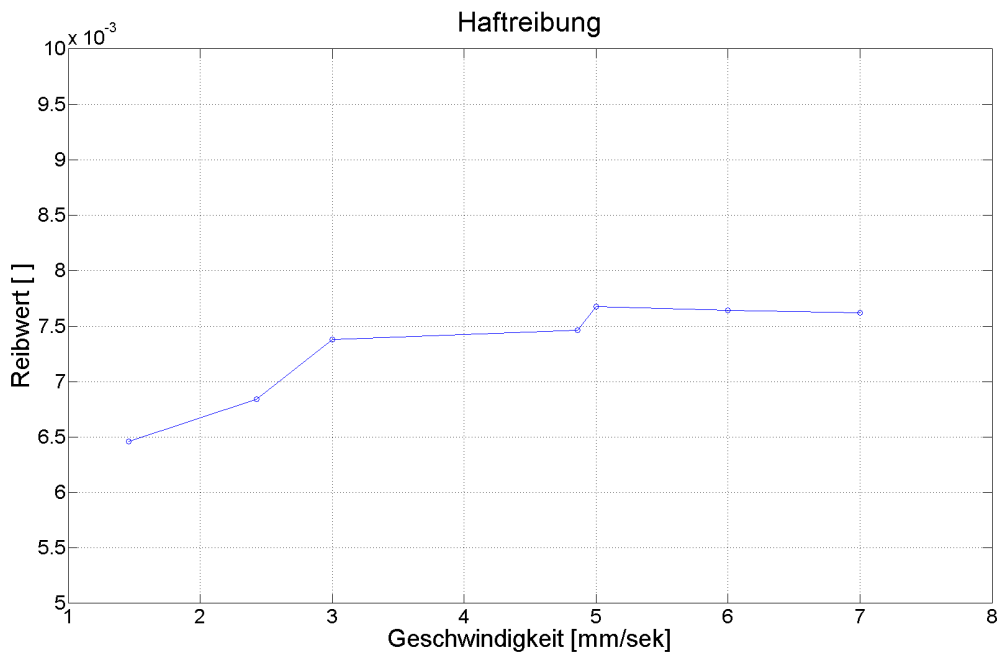


Abbildung 6.11: Darstellung des Haftreibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Auslenkgeschwindigkeit eines Axialgelenklagers GE30AW im Prüfstand. Geschwindigkeitsbereich $v = 1,46$ mm/sek bis $v = 7,29$ mm/sek.

Variation des Auslenkwinkels

Für die Variation des Auslenkwinkels ergeben sich die Kurven 6.12 und 6.13. In Abbildung 6.12 wird der Reibkoeffizient über dem Auslenkweg aufgetragen. Hierbei ist eine leicht sinkende Tendenz zu erkennen. Betrachtet man wiederum die Achsenskalierung, so erkennt man, wie schon bei der Geschwindigkeitsvariation, dass sich diese Änderung im Tausendstelbereich des Reibkoeffizienten abspielt und somit für Anwendungen bei Ermüdungsversuchen ohne Bedeutung ist.

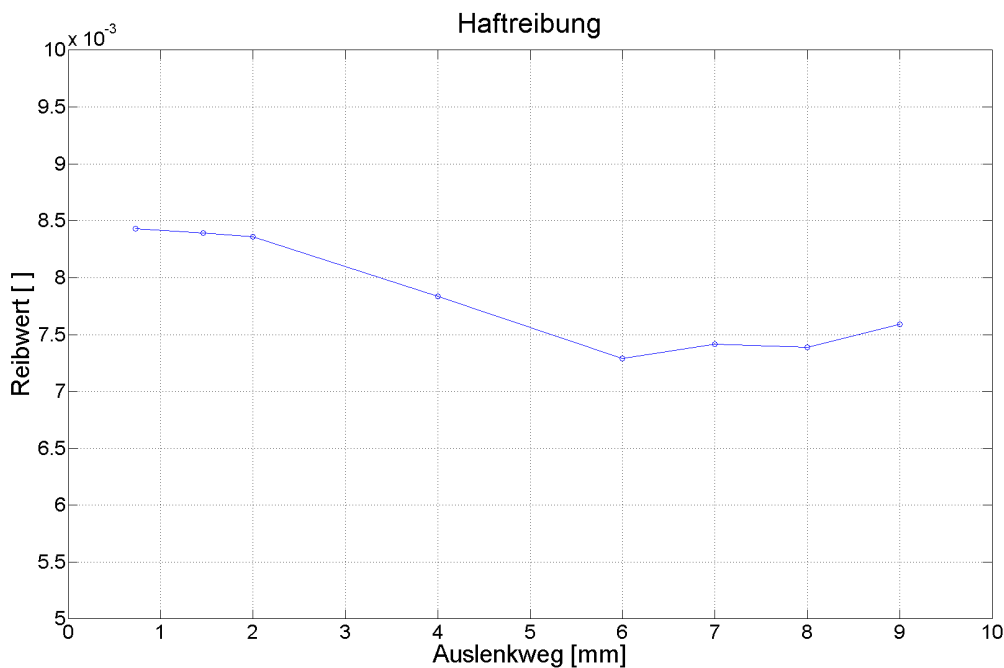


Abbildung 6.12: Darstellung des Gleitreibungskoeffizienten in Abhängigkeit des Auslenkwinkels eines Axialgelenklagers GE30AW im Prüfstand.

Sehr wohl ist eine Änderung jedoch zu erkennen, wenn man die Reibarbeit betrachtet. Dies ist auf den größer werdenden Weg zurückzuführen und in Abbildung 6.13 dargestellt. In dieser Abbildung 6.13 sind vier unterschiedliche Hysteresen zu erkennen. Die blaue Hysterese stellt die Reibarbeit für eine Vertikalbelastung von $F_V = -40$ kN, einer Geschwindigkeit von $v = 9,72$ mm/sek und einem Auslenkweg von $Z_{09s} = 0,73$ mm dar. Die rote Hysterese stellt die Reibarbeit für einen Auslenkweg von $Z_{09s} = 1,46$ mm, die pinke Hysterese-Kurve für einen Auslenkweg von $Z_{09s} = 4,86$ mm und die türkise Hysterese-Kurve für einen Auslenkweg von $Z_{09s} = 9,72$ mm bei gleichbleibenden restlichen Parametern dar. Zu erkennen ist, dass die Hysteresen mit größer werdendem Weg eine größere eingeschlossene Fläche und somit mehr Reibarbeit aufweisen. Ansonsten sind bis auf diese Entwicklung keine großen Unterschiede zu erkennen.

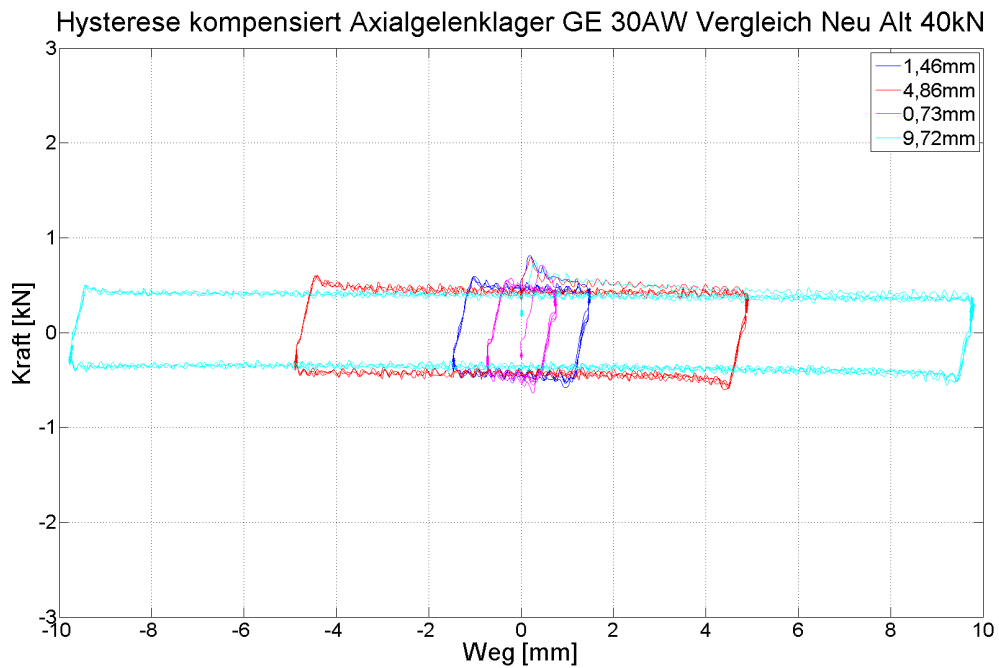


Abbildung 6.13: Darstellung der Hysterese eines Axialgelenklagers GE30AW bei einer Vertikalbelastung von $F_V = -40$ kN, einer Geschwindigkeit von $v = 9,72$ mm, einer Verweilzeit in den beiden Endpunkten von $t = 4$ s und den maximalen Auslenkwegen von $Z_{09s} = 0,73$ mm; $Z_{09s} = 1,46$ mm; $Z_{09s} = 4,86$ mm; $Z_{09s} = 9,72$ mm.

6.4.2 Axialgelenklager GE70AW

Das Axialgelenklager GE70AW wird so wie auch das Axialgelenklager GE30AW mittels des zuvor besprochenen Prüfprogramms (Tabelle 6.3) geprüft. Die daraus entstandenen ausgewerteten Daten werden wie folgt dargestellt.

In Abbildung 6.14 ist der Verlauf des Reibwertes über die Zeit aufgetragen. Die Vertikalbelastung betrug $F_V = -40$ kN, der Auslenkwinkel $\phi = \pm 1^\circ \hat{=} Z09s = \pm 9,72$ mm und die Geschwindigkeit $v = 4,86$ mm/sek. Das Verhalten des Axialgelenklagers GE70AW ist, sehr ähnlich dem zuvor besprochenen Axialgelenklager GE30AW. Wieder ist zu Beginn jeder Bewegung eine Signalspitze, welche durch die erhöhte Haftreibung verursacht wird, zu erkennen. Auf diese Signalspitze folgt dann über den restlichen Auslenkweg eine konstante Auslenkkraft, bis der Endpunkt erreicht wird.

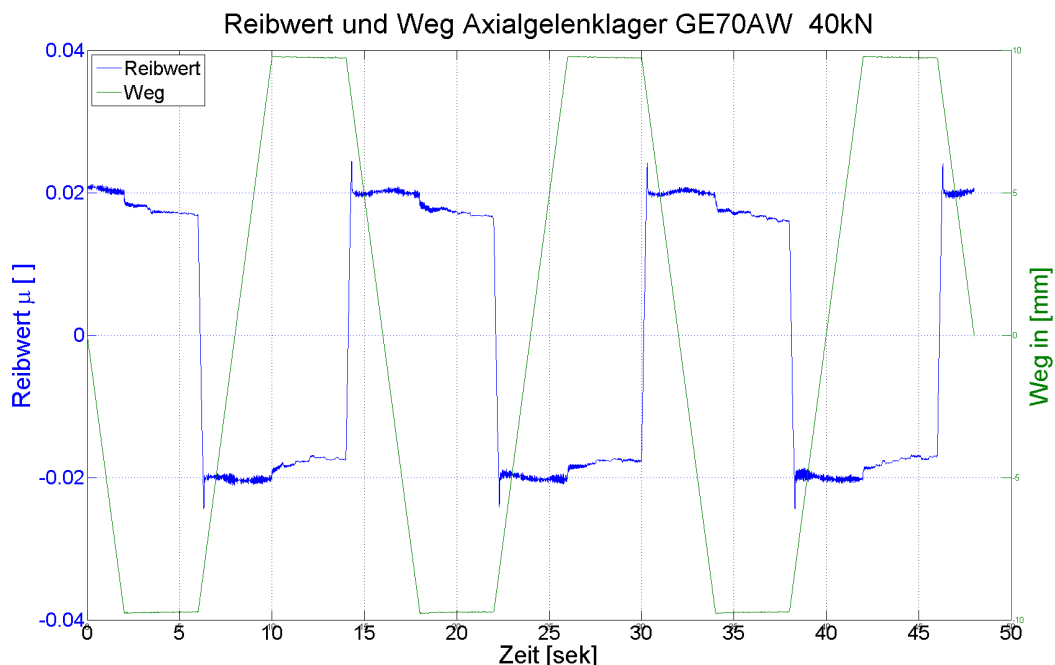


Abbildung 6.14: Reibwertverlauf eines Axialgelenklagers GE70AW bei einer Vertikalbelastung von $F_V = -40$ kN, einer Geschwindigkeit von $v = 4,86$ mm/sek, eines Auslenkweges von $Z09s = 9,72$ mm und einer Verweilzeit $t = 4$ s.

Trägt man die Reibkraft F_R nach der Berichtigung aller Einflüsse über dem Auslenkweg auf, so bekommt man wiederum die Hysterese-Kurve. Das heißt, die Reibarbeit W_R oder auch Verlustarbeit W_V kann an der eingeschlossenen Fläche der Kurve abgelesen werden. Abbildung 6.15 zeigt die ermittelte Hysterese-Kurve dieses Lagers bei gleichen Parametern für den auch in Abbildung 6.14 zugrunde gelegten Versuchslauf.

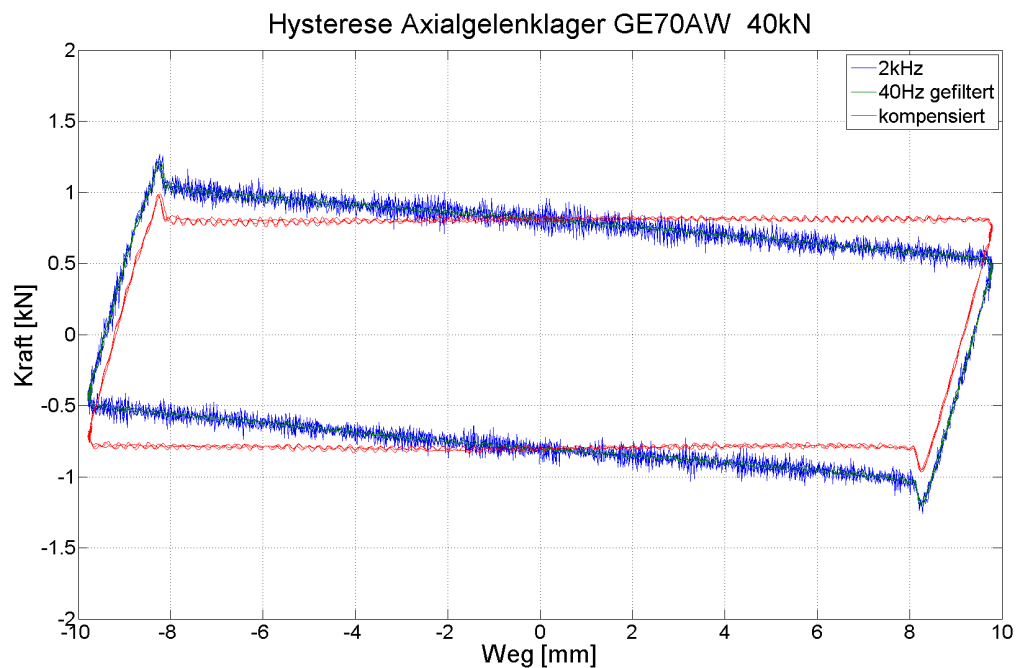


Abbildung 6.15: Hystere eines Axialgelenklagers GE70AW bei einer Vertikalbelastung von $F_Z = -40$ kN, einer Geschwindigkeit von $v = 4,86$ mm/sek, eines Auslenkweges von $Z_{09s} = 9,72$ mm und einer Verweilzeit $t = 4$ s.

Die Reibungskoeffizienten und die Reibarbeit bei diesem Lager unter diesen Bedingungen liegen bei:

- Haftreibungskoeffizient $\mu_H = 0,025$
- Gleitreibungskoeffizient $\mu_G = 0,02$
- Reibarbeit $W_R = 29,4$ J

Variation der Belastung

Für die Prüfungen der Belastungsvariation wurde die Prüftabelle 6.3 zur Spezifikation der Prüfparameter herangezogen. Das Ergebnis für die geprüften Reibwerte unter dieser Variation ist in Abbildung 6.16 dargestellt. Analog zum Kapitel 6.4.1 (Axialgelenklager GE30AW) und der darin enthaltenen Abbildung 6.9 verhält sich auch das Axialgelenklager GE70AW, welches in diesem Abschnitt behandelt wird. Der Reibungskoeffizient sinkt mit ansteigender Vertikalkraft. Wiederum gilt, dass die Hysterese mit ansteigender Vertikalkraft trotz sinkendem Reibwert steigt. Dies ist wieder auf die erhöhte Normalkraft $F_N = F_V$ zurückzuführen.

Hinzuzufügen ist, dass dieses Diagramm nur einen Teil des möglichen Einsatzgebietes dieses Lagers darstellt. Das Axialgelenklager GE70AW hat seine Maximalbelastung weit über dem mit diesem Prüfstand möglichen Vertikallasten von $F_V = -80$ kN. Jedoch ist in vielen Fällen bei Einsatz dieses Lagers in Ermüdungsversuchen nicht nötig mit höheren Kräften zu prüfen. Die Prüfbelastungen entsprechen daher auch in diesem Fall den Verhältnissen bei realen Ermüdungsversuchen.

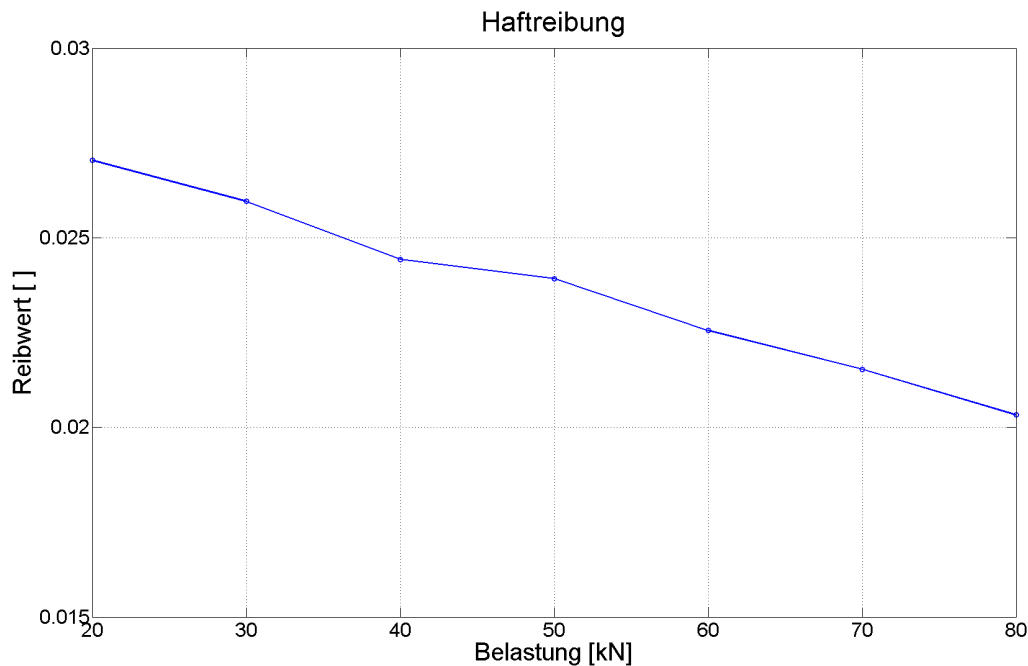


Abbildung 6.16: Darstellung des Haftreibungskoeffizienten bei unterschiedlichen Vertikalbelastungen für das Axialgelenklager GE70AW.

Variation der Geschwindigkeit

Für die Variation der Geschwindigkeit des Axialgelenklagers GE70AW ist, wie schon in den zuvor besprochenen Variationen, wiederum der Reibwert über der Geschwindigkeit aufgetragen. In Abbildung 6.17 ist zu erkennen, dass kein merklicher Anstieg des Reibwertes μ über der Geschwindigkeit erfolgt. Dadurch sind auch alle Hysterese-Kurven dieser Variation ident zu Abbildung 6.15 und werden hier nicht mehr dargestellt. Das bedeutet, dass die Variation der Geschwindigkeit in diesem, im Verhältnis zu anderen Anwendungen eher kleinem Bereich, keine Auswirkung auf Reibwert oder Reibarbeit hat.

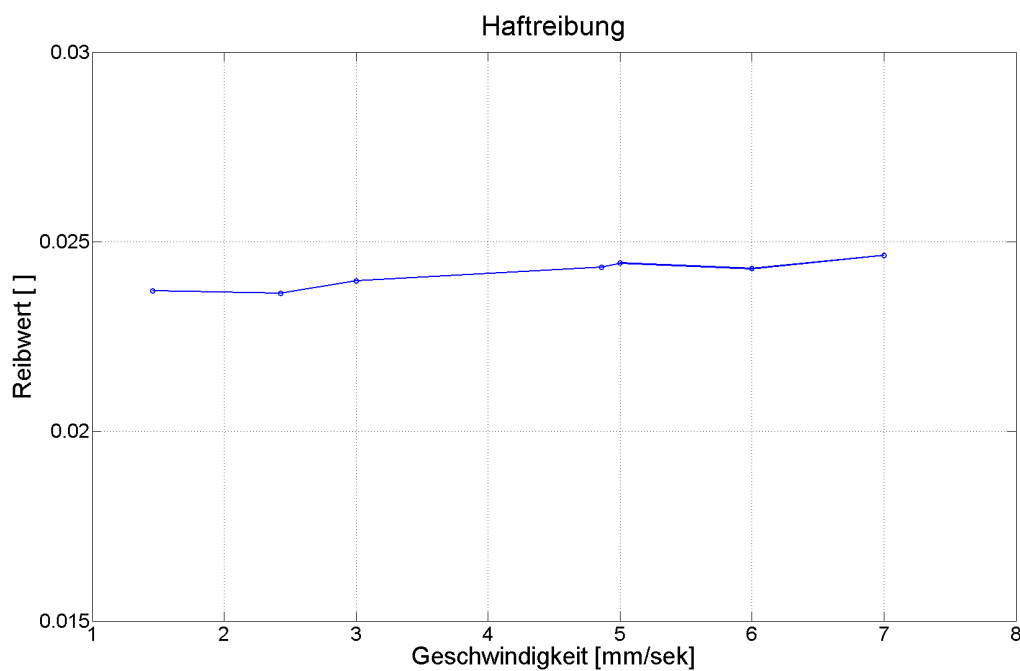


Abbildung 6.17: Darstellung des Haftreibungskoeffizienten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten für das Axialgelenklager GE70AW.

Variation des Auslenkwinkels

Auch bei dieser Variation gilt das Gleiche wie bei den Variationen zuvor. Zur Darstellung der Änderung des Reibwertes wird dieser über den Auslenkwinkel aufgetragen. Analog der Variation des Auslenkwinkels für das Axialgelenklager GE30AW gibt es keine signifikante Änderung des Reibwertes μ in Abbildung 6.18.

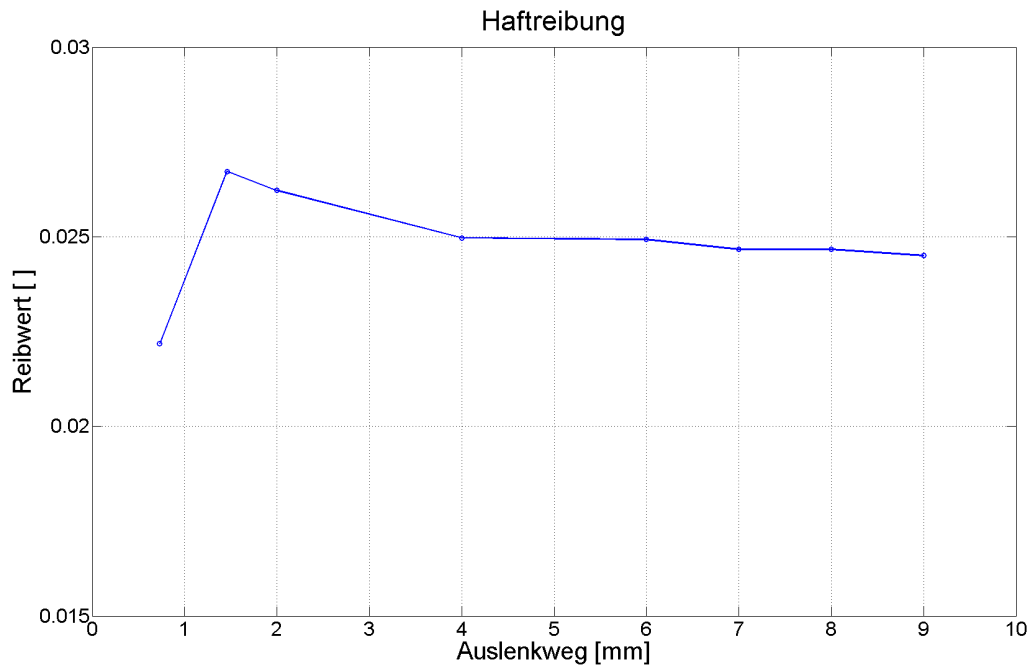


Abbildung 6.18: Darstellung des Haftreibungskoeffizienten in Abhängigkeit des Auslenkwinkels eines Axialgelenklagers GE70AW im Prüfstand.

Abbildung 6.19 zeigt ebenso keine signifikante Änderung bis auf die Reibarbeit W_R , welche mit größerem Weg größer wird.

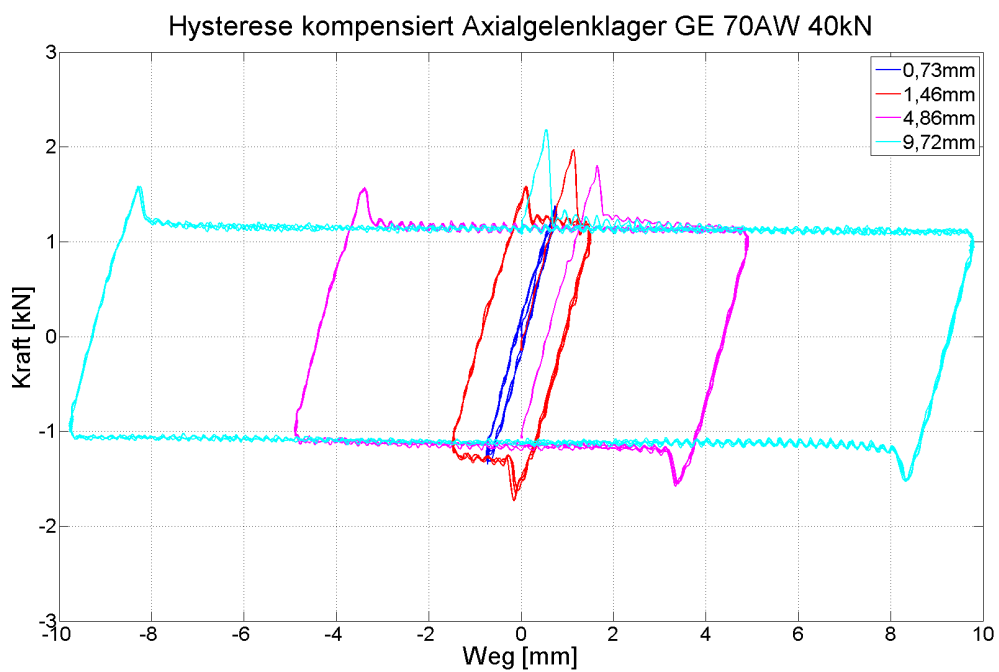


Abbildung 6.19: Darstellung der Hysterese eines Axialgelenklagers GE70AW bei einer Vertikalbelastung von $F_Z = -40$ kN, einer Geschwindigkeit von $v = 9,72$ mm, einer Verweilzeit in den beiden Endpunkten von $t = 4$ s und den Auslenkwegen von $Z_{09s} = 0,73$ mm; $Z_{09s} = 1,46$ mm; $Z_{09s} = 4,86$ mm; $Z_{09s} = 9,72$ mm.

6.4.3 Radialgelenkkopf GAR40UK-2RS

Das dritte und in dieser Diplomarbeit letzte Gelenklager, welches behandelt wird, ist ein Radialgelenkkopf vom Typ GAR40UK-2RS. Es handelt sich dabei um ein wartungsfreies Radialgelenklager mit Dichtung, welches, wie auch die Axialgelenklager, eine PTFE-Gleitschicht besitzt. Der Radialgelenkkopf GAR40UK wird, wie die zuvor besprochenen Axialgelenklager, ebenfalls nach demselben Prüfprogramm (Tabelle 6.3) geprüft. Die daraus entstandenen Diagramme werden im Folgenden dargestellt.

Die Abbildung 6.20 zeigt den Reibwertverlauf über die Zeit bei einer Vertikalbelastung von $F_V = -40 \text{ kN}$, einem Auslenkwinkel $\psi = \pm 1^\circ \hat{=} Z09s = \pm 9,72 \text{ mm}$ und einer Geschwindigkeit von $v = 4,86 \text{ mm/sek}$.

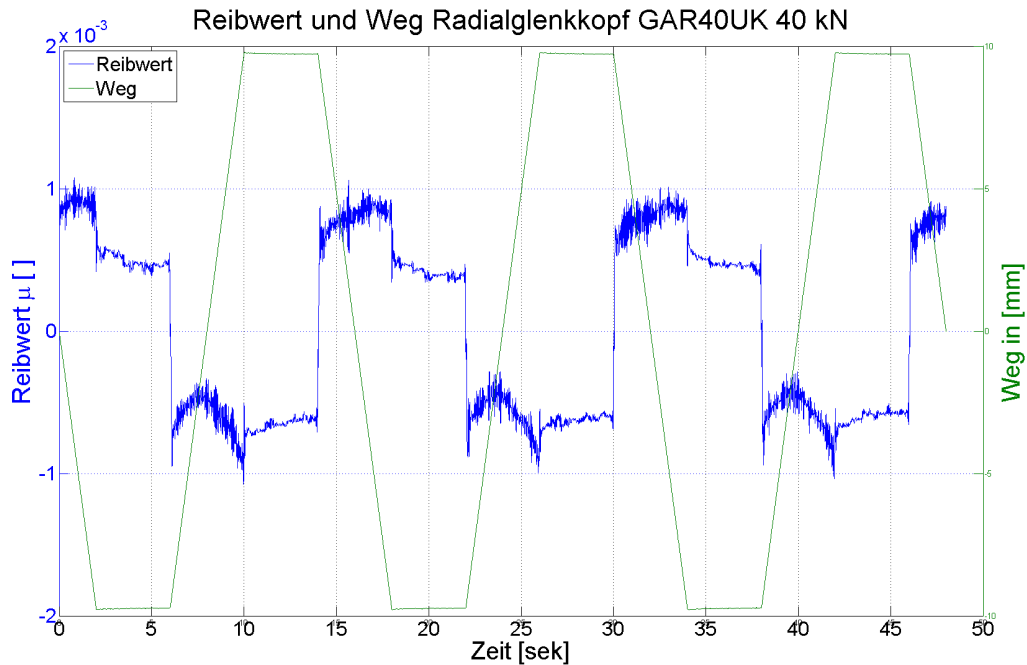


Abbildung 6.20: Reibwertverlauf eines Radialgelenkkopfes GAR40UK-2RS bei einer Vertikalbelastung von $F_V = -40 \text{ kN}$, einem Auslenkwinkel $\psi = \pm 1^\circ \hat{=} Z09s = \pm 9,72 \text{ mm}$, einer Geschwindigkeit von $v = 4,86 \text{ mm/sek}$ und einer Verweilzeit von $t = 4 \text{ s}$.

Abbildung 6.21 zeigt die Hysterese dieses Lagers (Prüfparameter ident wie der Versuch zu Abbildung 6.20).

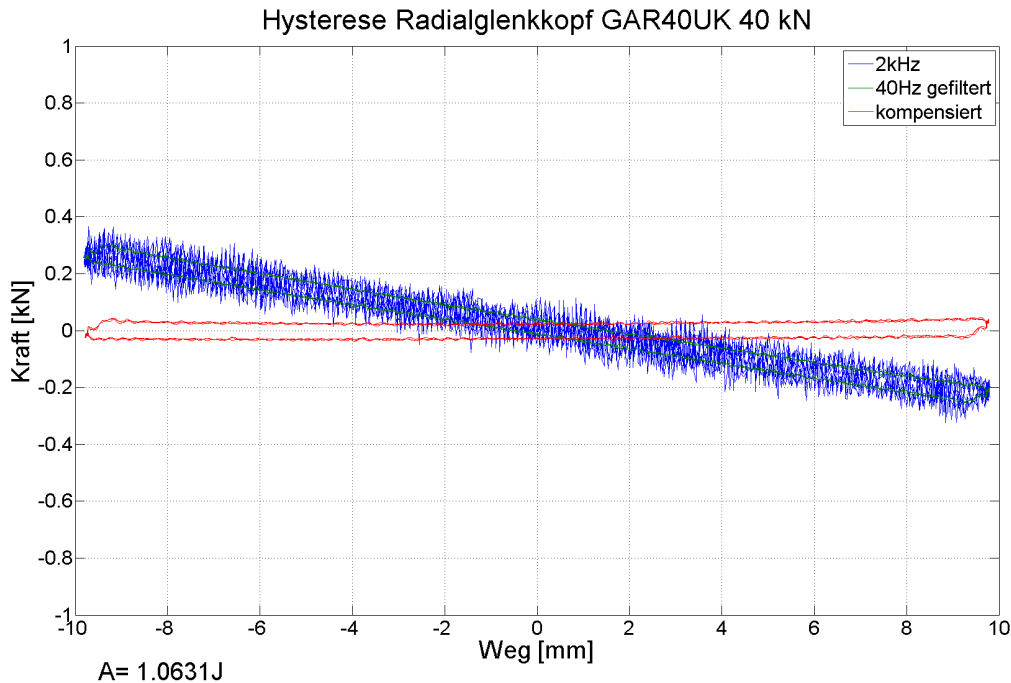


Abbildung 6.21: Hysterese eines Radialgelenkkopfes GAR40UK-2RS bei einer Vertikalbelastung von $F_V = -40$ kN, einem Auslenkwinkel $\psi = \pm 1^\circ \hat{=} Z09s = \pm 9,72$ mm, einer Geschwindigkeit von $v = 4,86$ mm/sek und einer Verweilzeit von $t = 4$ s.

Was auf den ersten Blick auffällt, ist, dass sowohl der Reibwert als auch die Hysterese kleinere Werte als bei den zuvor getesteten Axialgelenklagern aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Reibflächen eines Radialgelenkkopfes bedeutend kleiner sind als bei einem Axialgelenklager. Darum herrscht bei gleicher Belastung eine größere Flächenpressung und somit befindet sich das Lager in einem anderen Belastungszustand. Der Reibwertverlauf des Axialgelenklagers GE70AW ergibt einen ähnlichen Verlauf, wie bekannt (siehe Abbildung 6.14).

Die Reibungskoeffizienten und die Reibarbeit bei diesem Lager sind:

- Haftreibungskoeffizient $\mu_H = 0,0018$
- Gleitreibungskoeffizient $\mu_G = 0,0015$
- Reibarbeit $W_R = 2,19$ J

Variation der Belastung

Für den Reibwert der Vertikalbelastungsvariation des Lagers laut Prüftabelle 6.3 ergibt sich der folgende Graph 6.22. Wiederum wird hierfür der ermittelte Reibwert über die aufgebrachte Vertikallast aufgetragen. Analog des Kapitels 6.4.1 für das Axialgelenklager GE30AW und der in diesem Kapitel abgebildeten Abbildung 6.9 verhält sich auch dieses Lager. Der Reibungskoeffizient sinkt mit ansteigender Vertikalkraft. Analog zu Kapitel 6.4.1 verhalten sich auch die ermittelten Hysterese-Kurven und werden daher auch nicht dargestellt.

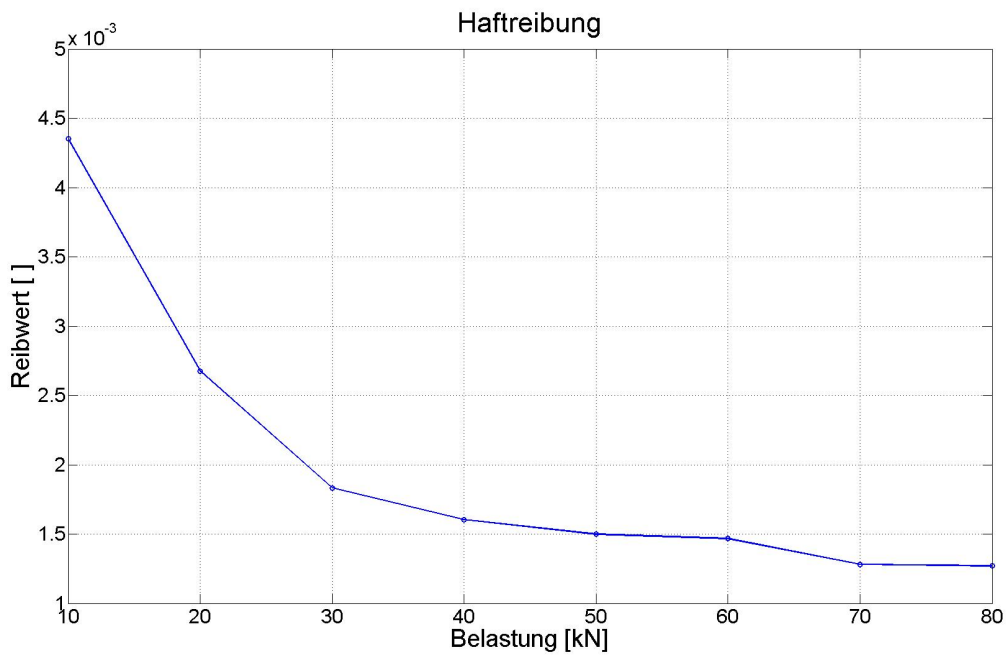


Abbildung 6.22: Darstellung des Haftreibungskoeffizienten bei unterschiedlichen Vertikalbelastungen für das Radialgelenklager GAR40UK.

Variation der Geschwindigkeit

Abbildung 6.17 zeigt das Ergebnis der Geschwindigkeitsvariation. In dieser Abbildung ist der Reibwert über der Geschwindigkeit aufgetragen. Wie auch schon von den Axialgelenklagern bekannt, ändert sich der Reibwert in Abhängigkeit der Geschwindigkeit kaum und ist daher in diesem Bereich und für die Anwendung in Ermüdungsversuchen vernachlässigbar.

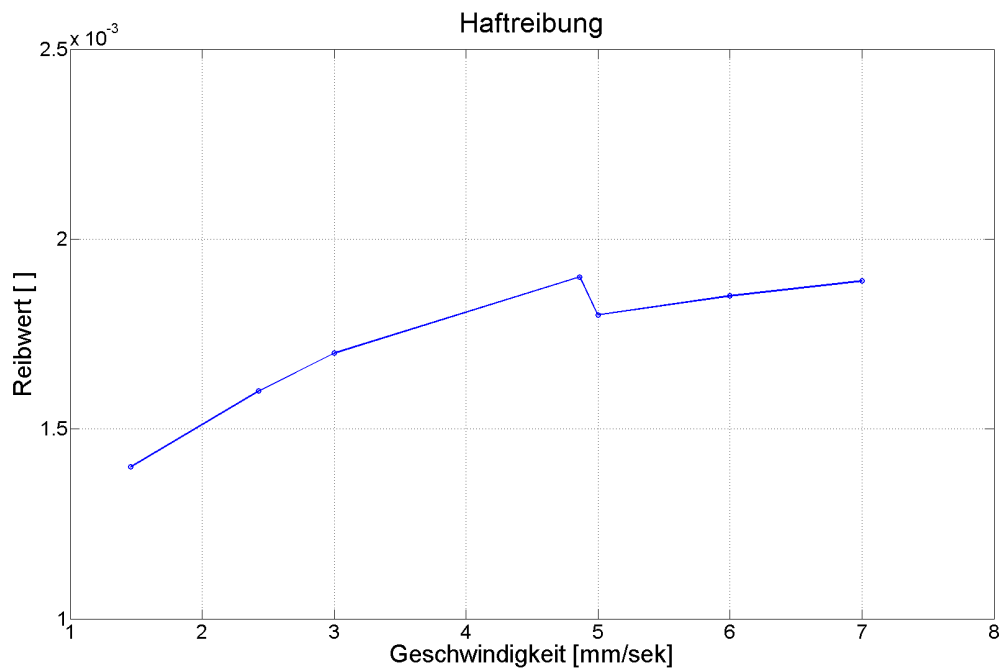


Abbildung 6.23: Darstellung des Haftreibungskoeffizienten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten für den Radialgelenkkopf GAR40UK-2RS.

Variation des Auslenkwinkels

Auch die Variation des Auslenkwinkels für den Radialgelenkkopf GAR40UK-2RS ergibt, wie in Abbildung 6.18 zu erkennen ist, keine signifikanten Änderungen bezüglich des Reibwertes. Wiederum ist zu erwähnen, dass der einzige Parameter, der sich mit dem Auslenkweg signifikant ändert, die Reibarbeit W_R ist.

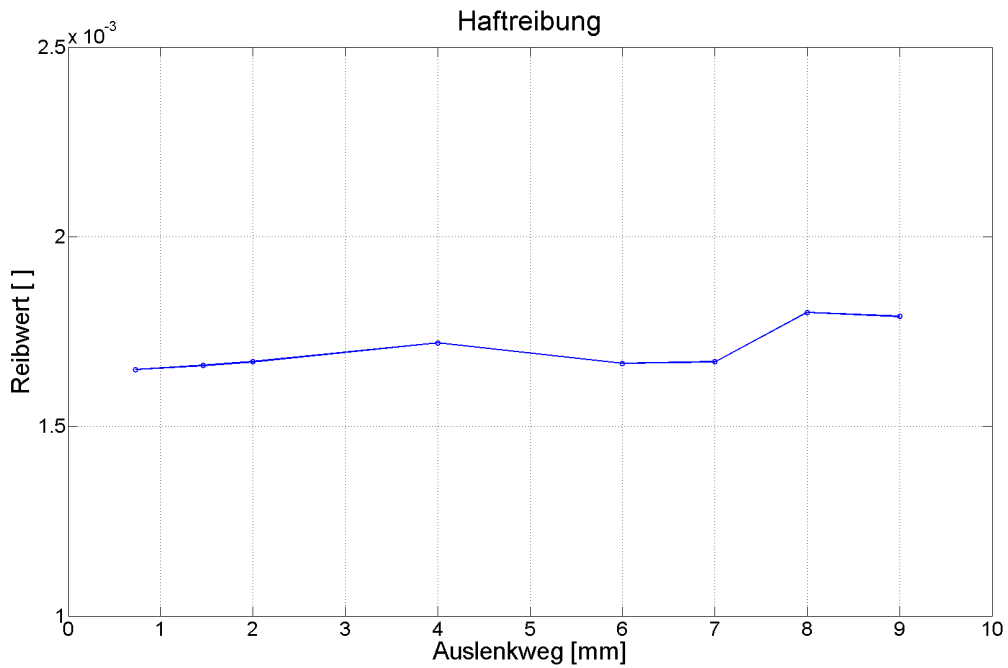


Abbildung 6.24: Darstellung des Haftreibungskoeffizienten in Abhängigkeit des Auslenkwinkels eines Radialgelenkkopfes GAR40UK-2RS im Prüfstand.

6.5 Zusammenfassung der Lager-Charakterisierung

Zusammenfassend über die untersuchten Bereiche und verschiedenen Lagertypen wurde die Tabelle 6.4 erstellt.

Reibwerttabelle				
Bezeichnung	realitätsnahe Prüfparameter μ_H (μ_G)	Geschwindigkeit	Belastung	Auslenkwinkel
GE30AW	0,012 (0,009)	0,008-0,013	0,005-0,02	0,007-0,009
GE70AW	0,025 (0,02)	0,017-0,028	0,01-0,035	0,015-0,018
GAR40UK-2RS	0,0012 (0,0001)	0,0008-0,0016	0,0003-0,008	0,0005-0,001

Tabelle 6.4: Zusammenfassung der Reibwerte geprüfter Gelenklager.

Wie aus dieser Tabelle 6.4 hervorgeht, sind in den Variationsbereichen der Geschwindigkeit und des Auslenkwinkels Änderungen des Reibwertes nur im tausendstel oder subtausendstel Bereich zu erkennen. In Anwendungen für Ermüdungsversuche können diese Parameter unter der Voraussetzung, dass sich die Prüfparameter im untersuchten Bereich wiederfinden, vernachlässigt werden. Wo sie hingegen sehr wohl berücksichtigt werden müssen, ist, bei der Einschätzung der Lebensdauer. Für die Variation der Belastung gilt jedoch eine signifikante Abhängigkeit von der Belastung. Diese Abhängigkeit wird in der Mikrotribologie beschrieben und erklärt sich folgendermaßen: Bei Erhöhung der Belastung werden die Gleitflächen bis zu einer kritischen Belastung elastisch verformt und dadurch aneinander angeglichen. Infolge dessen verringert sich der Reibwert, je höher die Belastung, bezogen auf die Größe der Gleitfläche. Wird eine kritische Flächenpressung überschritten, so kommt es zu einer plastischen Verformung und zum dramatischen Anstieg des Reibwertes. Somit gibt es für jeden Lagertyp, bezogen auf die Gleitfläche, den optimalen Arbeitsbereich. Bei Überdimensionierung des Lagers wird der Einfluss, welcher durch die Reibung eingebracht wird, unnötig größer als notwendig. Bei Unterdimensionierung kommt es frühzeitig zu großem Verschleiß und ebenfalls zu einem unnötig größer werdenden Einfluss der Reibung.

Kapitel 7

Lebensdaueruntersuchungen an Gelenklagern

In diesem Kapitel 7 wird die Lebensdauer von wartungsfreien und wartungspflichtigen Gelenklagern untersucht.

7.1 Lebensdauerbetrachtung für wartungsfreie Gelenklager

Wartungsfreie Gelenklager haben ausschließlich eine als Feststoffschmierung fungierende Beschichtung auf der Gleitfläche des Lagers. Diese Beschichtung ist meist sehr resistent gegen Druckbelastungen und wird durch Relativbewegungen der Gleitflächen an der Oberfläche abgeschert. Die feinen Partikel, die durch die Abscherung entstehen, lagern sich in der Oberfläche der Gegenseite ab und ergeben damit eine Gleitschicht.

Wie aus dieser Betrachtung hervorgeht, verbrauchen wartungsfreie Gelenklager mit jeder Relativbewegung der Gleitflächen einen kleinen Teil ihrer Schmierschicht und sind sehr resistent gegenüber Belastungsstößen.

Daher ist die optimale Verwendung dieser Lager auch nicht abhängig von der Belastungsart, sondern von der Bewegung, welche die Gleitflächen des Lagers vollziehen. Das heißt, wartungsfreie Gelenklager können bei schwellender Last und bei wechselnder Last eingesetzt werden, bei großen Schwenk- und Kippbewegungen erhöht sich aber der Verschleiß.

Um einen Einblick in die Komplexität einer Lebensdauerberechnung und die dahinterstehende Problematik zu geben, wird in Kapitel 7.1.1 eine Berechnung der Lebensdauer laut Lagerhersteller berechnet.

7.1.1 Berechnungsrichtlinie laut INA FAG Gelenklager Katalog 238

Diese Lebensdauerberechnung wird laut ISO 281 durchgeführt[1]. Formeln wurden dem Gelenklager Katalog 238 entnommen[1]. Grundlage, der in ISO 281 genormten Lebensdauerberechnung ist die Ermüdungstheorie von Lundgren und Palmgren, welche in jedem Fall zu einer endlichen Lebensdauer führt.

Berechnung der Lebensdauer für ein wartungsfreies Radial-Gelenklager:

- DIN ISO 12240-1 Maßreihe E
- Gleitpaarung Hartchrom/PTFE
- Gleitwerkstoff: Elgoglide
- Type: GE 40 UK-2RS

Wichtige Parameter für die Berechnung:

- Radialkraft $F = 40 \text{ kN}$ (Prüfstandsparameter)
- Schwenkwinkel $\beta = 0,5^\circ$ (Prüfstandsparameter)
- Frequenz $f_A = 4 \text{ Hz}$ (Prüfstandsparameter)
- dynamische Tragzahl $C_r = 277.000$ (Lager-Datenblatt)
- Kugeldurchmesser $d_K = 53 \text{ mm}$ (Lager-Datenblatt)
- Tragzahlbeiwert für Elgoglide $K = 300 \text{ N/mm}^2$ (Lager-Datenblatt)
- Temperaturfaktor für $-20^\circ - +150^\circ$ $f_2 = 1$ (Lager-Datenblatt)
- Lagerbauartfaktor für Radial-Gelenklager $f_4 = 1$ (Lager-Datenblatt)
- Lastfaktor für Wechsellast $f_5 = 1$ (Lager-Datenblatt)

Die Flächenpressung p für die oben genannte Last wird mit folgender Formel berechnet:

$$p = K * \frac{P}{C_r} = 43,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (7.1)$$

Die Gleitgeschwindigkeit v errechnet sich mit:

$$v = 2,91 * 10^{-4} * f_4 * d_K * \beta * f_A = 0,031 \frac{\text{mm}}{\text{sek}} \quad (7.2)$$

Der Geschwindigkeitsfaktor f_v errechnet sich mit:

$$f_v = \frac{1,6228}{1,004243^{v * p^{0,31876}}} = 1,622 \quad (7.3)$$

Der Schwenk- bzw. Oszillationswinkelfaktor f_6 errechnet sich mit:

$$f_6 = 0,7579 * 1,0093^\beta = 0,7614 \quad (7.4)$$

Der Gleitweg s errechnet sich mit:

$$s = \frac{1408185}{1,0291^p} = 406.674m \quad (7.5)$$

Die theoretische Lebensdauer L bei konstanter Last (wartungsfreie Gelenklager und Gleitbuchsen) errechnet sich mit:

$$L = \frac{f_2 * f_v}{f_6} * \frac{s * f_A}{v} * 14 = 1,5 * 10^9 \text{ Lastwechsel} \quad (7.6)$$

Das heißt, die genormte Lebensdauerberechnung für einen exemplarisch aussagekräftigen Fall bei Ermüdungsversuchen ergibt 1,5 *Milliarden Lastzyklen*. Dieses Ergebnis gilt trotz sehr vieler miteinbezogener Faktoren für Temperatur, Lagerbauart, Lastart und Geschwindigkeit, aber nur für den Idealfall.

7.1.2 Wichtige Faktoren der Lebensdauereinschätzung

Wichtige Faktoren, die nicht in der vorangegangenen Berechnung der Lebensdauer berücksichtigt wurden:

- Reibung und der daraus verursachte Verschleiß
- Das radiale- bzw. axiale Lagerspiel, welches im Prüfstandsbetrieb für Ermüdungsversuche Schläge auf das Lager verursacht
- Schwenk- und Kippbewegungen sind in den betrachteten Ermüdungsversuchen sehr klein
- Sauberkeit im Schmierspalt
- Vibrationen, welche zusätzliche Mikrobewegungen erzeugen
- Feuchtigkeit der Umgebung
- Korrosion
- Alterung

Diese Faktoren sind nicht nur einzeln für sich dominante Größen für die Lebensdauer. Der viel komplexere und wichtigere Anteil dieser Faktoren an der Lager-Lebensdauer ergibt sich durch das Zusammenspiel der Faktoren miteinander und gegeneinander.

Dies macht eine Vorhersage der Lebensdauer sehr schwierig und in vielen Bereichen nur näherungsweise möglich. Um trotzdem eine experimentelle Aussage über die Lebensdauer zu treffen, wurde folgendes Prüfprogramm 7.1 erstellt. Aus diesen Prüfungen und einer Verwendungsmatrix (Tabelle 7.2) soll in weiterer Folge eine Richtlinie für die Verwendung von Gelenklagern bei Ermüdungsversuchen erstellt werden (nicht mehr Inhalt dieser Diplomarbeit).

7.1.3 Analyse der Lebensdauer des Radialgelenkkopfes GAR40UK-2RS

Abbildung 7.1 stellt ein Diagramm dar, wo der Haftreibungskoeffizient über der Anzahl der aufgetragenen Lastzyklen aufgetragen ist.

Für dieses Diagramm wurde ein Neulager in den Prüfstand eingebaut und laut Prüfprogramm (Tabelle 6.3) über alle angegebenen Prüfläufe geprüft. Nach dem Durchführen der Prüfungen wurde das Lager mit einer definierten Last von $F_V = -40$ kN vertikal belastet und mittels eines Sinus (Frequenz $f_A = 3$ Hz und Amplitude von $Z_{09s} = \pm 2,43$ mm $\hat{=} \pm 1^\circ$) ausgelenkt. Nach einer bestimmten Zyklenanzahl wurde die dynamische Prüfung gestoppt und das gesamte Prüfprogramm wurde abgefahren.

Wie man in dieser Abbildung 7.1 sieht, hat das Lager am Anfang einen höheren Reibwert μ . Nach einer Einlaufzeit von etwa 100.000 Lastzyklen hat das Lager den minimalen Reibwert erreicht, welcher danach kontinuierlich wieder ansteigt, bis er nach 10 Millionen Lastzyklen wieder den gleichen Wert hat wie zu Beginn der Prüfung. Dieser kontinuierliche Anstieg zeigt einen leicht progressiven Verlauf, was darauf deuten könnte, dass es zu einem bestimmten Zeitpunkt einen rapiden Anstieg des Reibwertes gibt.

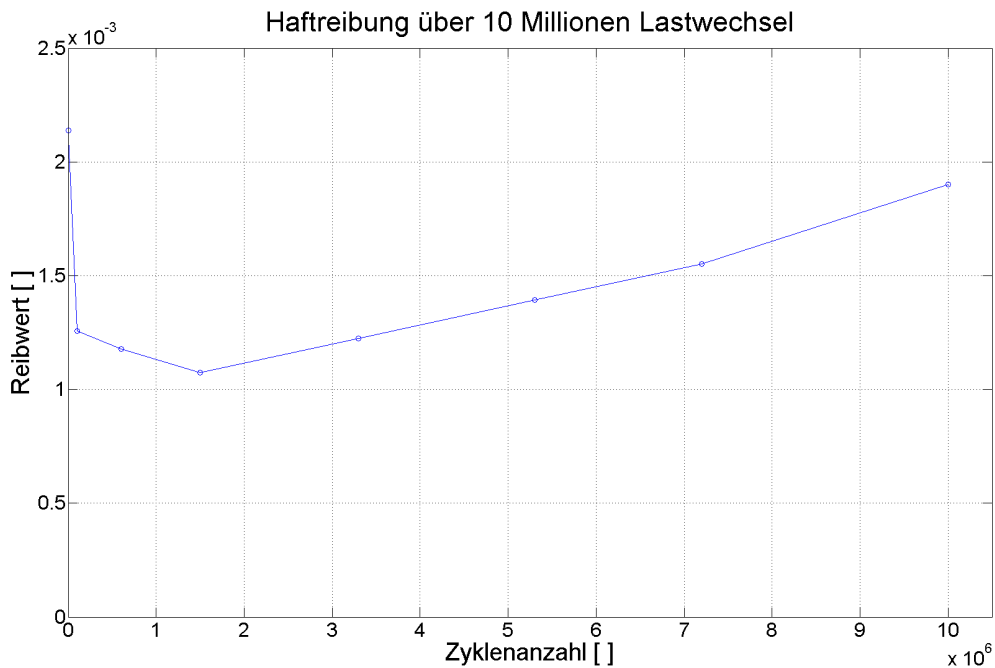


Abbildung 7.1: Darstellung des Haftreibungskoeffizienten über die Lastzyklenanzahl eines Radialgelenkkopfs GAR40UK im Prüfstand.

7.2 Lebensdauerbetrachtung für wartungspflichtige Gelenklager

Wartungspflichtige Gelenklager müssen regelmäßig geschmiert werden. Laut Hersteller gibt es für unterschiedliche Einsatzgebiete unterschiedliche Fette, die herangezogen werden müssen. Die Gleitpaarungen dieser Lager sind meist Stahl/Stahl oder in manchen Fällen Stahl/Bronze. Das Fett wird mittels eines Schmiernippels am Gelenkkopf und entsprechenden Bohrungen und Verteilnuten am Gelenklager zwischen die Gleitflächen gepresst. Zur Sicherstellung der Fettschmierung muss eine wechselnde Belastungsart auf das Lager wirken. Mit einer wechselnden Belastung wird sichergestellt, dass ein Abheben der beiden Gleitflächen auftritt, sodass Fett zwischen die Flächen gelangen kann.

Wird ein wartungspflichtiges Axialgelenklager nur schwellend betrieben, so kann es je nach Lastamplitude zu einem Bruch oder zu einem nicht mehr funktionstüchtigen Lager kommen.

7.2.1 Wichtige Faktoren zur Lebensdauereinschätzung

Folgende Faktoren beeinflussen die Lebensdauer maßgebend:

- Reibung und der daraus verursachte Verschleiß
- Schmierzyklus
- Schmiermenge
- Schmiermittel
- Das radiale- bzw. axiale Lagerspiel, welches im Prüfstandsbetrieb für Ermüdungsversuche Schläge auf das Lager verursacht
- Schwenk- und Kippbewegungen
- Sauberkeit im Schmierpalt
- Vibrationen, welche zusätzliche Mikrobewegungen erzeugen
- Feuchtigkeit der Umgebung
- Korrosion
- Alterung

7.3 Ausblick auf weiterführende Lebensdaueruntersuchungen

Für bestmögliche weitere Erkenntnisse zum Thema Lebensdauer sollen nachfolgend an die vorliegende Arbeit verschiedene Fragestellungen untersucht werden. Zuerst werden Versuche gemacht, welche den Bereich der wartungspflichtigen Lager abdecken. Hierzu sollen Lager mit unterschiedlichen Schmierzyklen, Schmiermethoden und Belastungssignale geprüft und untersucht werden. Weiters sollten andere Lagertypen im Prüfstand zum Einsatz kommen, um eine größere Vergleichsbasis zu bekommen. Dazu wurde ein Prüfprogramm erstellt (siehe Tabelle 7.1)

Prüfung 1 in Tabelle 7.1 soll die Lebensdauer unter typischen Prüfbedingungen für ein wartungsfreies Gelenklager darstellen.

Prüfung 2 soll den Vergleich zwischen wartungsfreien und wartungspflichtigen Gelenklagern bei gleichen Prüfbedingungen zeigen.

Prüfung 3 ist identisch zur Prüfung 2 mit demselben Gelenklager, aber mit dem Unterschied, dass bei Prüfung Nummer 3 ein spezieller Schmierzyklus eingebaut wird, um Schmierfett zwischen die Gleitflächen zu pressen.

Nr.	Lagertype	Signal, Frequenz	Horizontal- auslenkung	Vertikalbelastung, Belastungsart	Untersuchungs- gegenstand
1	GAR40UK	Sinus, 4 Hz	$\pm 2,43 \text{ mm } (\pm 0,25^\circ)$	-40 kN, Druck	Reibkoeffizient
2	GIR40DO	Sinus, 4 Hz	$\pm 2,43 \text{ mm } (\pm 0,25^\circ)$	-40 kN, Druck	Reibkoeffizient
3	GIR40DO	Sinus, 4 Hz	$\pm 2,43 \text{ mm } (\pm 0,25^\circ)$	-40 kN, Druck mit Entlastungszyklen	Reibkoeffizient
4	GAR40UK	Sinus, 4 Hz	$\pm 9,72 \text{ mm } \hat{=} \pm 1^\circ$	-40 kN, wechselnd	Reibkoeffizient
5	GIR40DO	Sinus, 4 Hz	$\pm 9,72 \text{ mm } \hat{=} \pm 1^\circ$	-40 kN, wechselnd	Reibkoeffizient

Tabelle 7.1: Tabelle für ein Prüfprogramm zur messtechnischen Bestimmung von Lebensdauereinflüssen.

Als nächster Schritt sollen wechselnde Belastungen und komplexe Belastungszyklen untersucht werden.

7.4 Möglichkeiten zur Verlängerung der Lebensdauer

Die Möglichkeit zur Verlängerung der Lebensdauer bei Gelenklagern in Ermüdungsversuchen ist eine sehr komplexe Angelegenheit. Auf der einen Seite sollen Gelenklager sehr lange halten, auf der anderen Seite sollen parasitäre, den Prüfstand beeinflussende oder verändernde Einflüsse so gering wie möglich gehalten werden. Dies widerspricht sich jedoch in einigen Situationen. Vor allem bei der Auslegung von Lagern muss genauestens darauf geachtet werden, einen guten Kompromiss aller Einflussfaktoren zu finden.

Tabelle 7.2 zeigt, wie die drei Hauptgruppen von Gelenklagern bei Ermüdungsversuchen eingesetzt werden sollten. Darin sind fünf verschiedene Belastungsgruppen, vier Prüfarten und drei allgemeine Eigenschaften, enthalten.

Die Bewertung erfolgte über drei Stufen:

+ gut

0 akzeptabel

- schlecht.

		wartungsfreie Lager	wartungspflichtige Lager	Festkörpergelenke
Belastung	wechselnd	+	+	+
	schwellend	+	-	+
	konstant	+	-	+
	große Bewegung	o	+	-
	kleine Bewegung	+	+	+
	hohe Last	+	o	-
	geringe Last	o	+	+
Prüfart	zufallssignal	-	-	+
	nachfahrtsignal	o	o	+
	blockversuche (Sinus)	o	o	+
	niederfrequent (< 5Hz)	+	o	+
	mittelfrequent (< 20Hz)	o	-	+
	Hochfrequent (> 20Hz)	-	-	+
Allgemeines	Kosten (Anschaffung)	o	o	-
	Handling (Einbau)	+	+	-
	Lagerspiel	o	-	+
	Wartung (Prüfbetrieb)	+	-	+
	Wiederverwendung	-	o	+

Tabelle 7.2: Verwendungsmatrix verschiedener Gelenklagertypen.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Beruhend auf einer Analyse von prinzipiellen Anforderungen sowie der messtechnischen Erfassung der realen Lasten und Bewegungsumfänge für gelenkige Anbindungen bei Ermüdungsversuchen wurde im Zuge der vorliegenden Arbeit ein spezieller Gelenkprüfstand konzipiert und realisiert.

Mit diesem Gelenkprüfstand können die wichtigsten Kennwerte - der Reibwert und das Lagerspiel - von Axialgelenklagern und Radialgelenkköpfen für unterschiedliche statische und dynamische Belastungen ermittelt werden.

Das zu prüfende Lager wird im als Kniehebel ausgeführten Prüfstand zwischen einer nach unten fixierten Reaktionskraftabstützung in Form eines Dreiecks, einem zur Belastung des Lagers von oben abgestützten servo-hydraulischem Prüfzylinder, und einem für eine definierte Auslenkung des Lagers im Kugelmittelpunkt horizontal angebrachten servo-hydraulischem Prüfzylinder realisiert.

Mit dem realisierten Gelenkprüfstand wurden verschiedene Lagertypen unter unterschiedlichsten statischen und dynamischen Prüflasten charakterisiert. Besonderer Wert wurde im Zuge der Versuche auf die Veränderung des Reibwertes bei verschiedenen Auslenkgeschwindigkeiten, Auslenkwegen, Belastungen und die Veränderung des Reibwertes über die Zahl der aufgebrachten Lastwechsel gelegt.

Die Auswertung der Ergebnisse aus den Prüfläufen zeigte, dass sich der Reibwert in den untersuchten Gelenklagern nur in Bezug auf die Belastung und die Lastwechselanzahl signifikant verändert.

Im letzten Teil der Arbeit wurden die Lebensdauer und lebensdauerbeeinflussenden Parameter der verwendeten Gelenklager eingehend untersucht. Abgeleitet aus den experimentellen Ergebnissen konnte damit eine Einsatzmatrix für typische Prüfstandsanforderungen für Ermüdungsversuche erstellt werden.

Die durch die vorliegende Arbeit gewonnenen Erkenntnisse für die Eigenschaften von Gelenklagern bei Ermüdungsversuchen können sowohl die Einsatzzeit von Vorrichtungsteilen als auch die Qualität von Ermüdungsversuchen - hinsichtlich definierter Lastein-

und Lastauskopplung bzw. Reproduzierbarkeit des Versuchs - entscheidend verbessern (erhöhen).

Bereits geplante weiterführende Prüfungen am Gelenkprüfstand in Form der Charakterisierung weiterer Lagertypen für erweiterte dynamische Belastungsszenarien sollen die bislang erzielten Ergebnisse absichern und die Anwendung der untersuchten Lagertypen für ein größeres Einsatzgebiet ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [1] *INA-Schaeffler KG Katalog 238: Gelenklager, Gleitbuchsen, Gelenkköpfe*, 2003.
- [2] FREMEREY, J. K.: *Permanentmagnetische Lager*. Forschungszentrum Jülich, 2000.
- [3] LEYER, A.: *Theorie des Gleitlagers bei Vollschmierung 2*. Hallwag-Verlag, 1967.
- [4] LIENKÄMPER: *Gelenkkopf*. <http://www.lienkaemper.de/products/Waelz-und-Nadellager/Gelenkkopf-GIPFR-Feingew-GIPFR-10-PW-M-10-RG.html?cat=10003260&&XTCSid=a4dc33985beaa2c14e9a5c98c7bb5537>, 2013.
- [5] MBO: *Hydraulik-Gelenkkopf*. <http://www.directindustry.de/prod/mbo-osswald/hydraulik-gelenkkopfe-15621-712477.html>, 2013.
- [6] SCHENCK: *Hydropuls-Spezifikation 1.01.10-7903*, 1964.
- [7] SCHLECHT, B.: *Maschinenelemente 2 Getriebe - Verzahnungen - Lagerungen*. Pearson Studium, 2010.
- [8] SICK SENSOR INTELLIGENCE: *Operating Instructions, OD Precision Displacement Sensor*, 2013.
- [9] SKF: *Gelenklager der TX-Line Baureihe brauchen keine Wartung*. <http://evolution.skf.com/de/gelenklager-der-tx-line-baureihe-brauchen-keine-wartung/>, 2003.