

Analyse des Bewegungsverhaltens von Kugelgelenken in PKW-Fahrwerken im akustisch relevanten Frequenzbereich

Thomas Jeglitzka¹, Daniel Sachse², Jochen Wiedemann¹

¹Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart, Email: thomas.jeglitzka@fkfs.de,

²Daimler AG, Email: Daniel.Sachse@daimler.com

1. Einleitung

Die dynamischen Eigenschaften eines Pkw-Fahrwerks werden von zahlreichen Faktoren beeinflusst. Insbesondere im akustisch relevanten Frequenzbereich kommt den beweglichen Bindungselementen in Fahrzeugachsen eine wichtige Rolle zu. Im Gegensatz zu Elastomerlagern, wurden die stark reibungsbehafteten Kugelgelenke unter diesem Gesichtspunkt bisher kaum beachtet. Für die Analyse der dynamischen Eigenschaften wurde am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) in Kooperation mit der Daimler AG ein Komponentenprüfstand entwickelt, der es erlaubt, das rotatorische Bewegungsverhalten und das Reaktionsmoment eines Gelenks detailliert zu erfassen.

Gegenstand der Untersuchung bildet dabei das Gelenkverhalten im akustisch relevanten Frequenzbereich, das von niederfrequenten Schwingungsphänomenen eines Fahrzeugs beeinflusst wird.

2. Analyse des Bewegungsverhaltens von Kugelgelenken

Zur Untersuchung des Gelenkverhaltens wurde ein Prüfstand konzipiert, der die Möglichkeit bietet, eine Kippbewegung an einem seriennahen Gelenk auszuführen. Dabei kommt es zu einer Drehbewegung des Gelenkgehäuses um die Kugelmittelpunkt des Kugelzapfens, welcher am Schaft fest in der Messanordnung (s. Abbildung 1) eingespannt ist. Der Kugelzapfen ist über eine Kunststoff-Kugelschale mit geschmiertem Gleitspalt mit dem Gelenkgehäuse verbunden und ermöglicht so eine Drehbewegung.

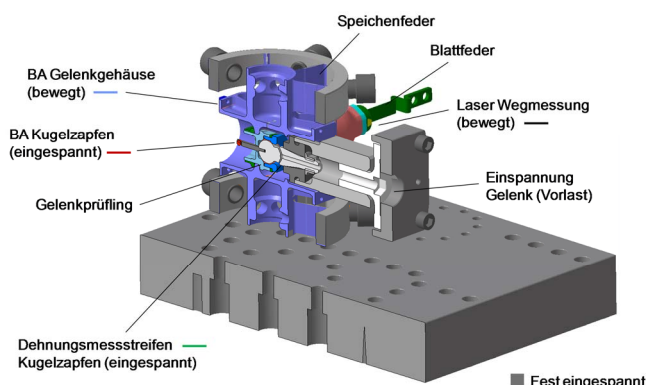


Abbildung 1: Gelenkprüfstand mit eingebautem Prüfling und Messaufnehmern.

In Abbildung 1 ist der bewegliche Umfang des Prüfstands, der fest mit dem Gelenkgehäuse verbunden ist, eingefärbt dargestellt. Auf diese drehende Masse wird an den Blattfeder-Enden über zwei synchronisierte elektrodynamische Shaker ein Moment aufgebracht. Fest einge-

spannte Teile sind grau markiert. Die Lagerung der beweglichen Masse ist über zwei Speichenfedern (s. Abbildung 1) realisiert und lässt eine Drehbewegung um die vertikale Drehachse für eine definierte Drehsteifigkeit zu. Die Einspannung wurde mit Hilfe eines FE-Modells ausgelegt und die linear-elastischen Eigenschaften in Versuchen für den relevanten Betriebsbereich verifiziert. Der gesamte Prüfstand besitzt eine ausreichend hohe Struktursteifigkeit um den Einfluss unerwünschter Eigenfrequenzen zu minimieren. Die erste Eigenfrequenz liegt bei 760 Hz. Im Versuch werden die Gelenke mit einer fahrbahnähnlichen Anregung kraftgesteuert ausgelenkt, die neben der akustisch relevanten Anregung auch die niederfrequenten Schwingungsphänomene am Fahrwerk beinhaltet.

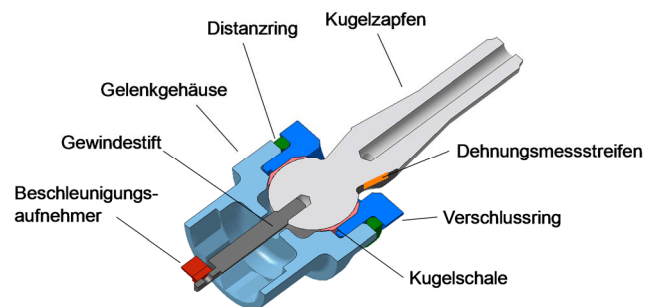


Abbildung 2: Gelenkprüfling mit Halbleiter-Dehnungsmessstreifen und Beschleunigungsaufnehmer.

Mit der applizierten Messtechnik werden der Verdrehwinkel und die Winkelbeschleunigung des Gelenkgehäuses erfasst, das sich in einer Kippbewegung um die Kugelmittelpunkt dreht (s. Abbildung 1). Dabei wird für die Wegmessung ein hochgenauer Lasersensor eingesetzt und über triaxiale Beschleunigungsaufnehmer die Winkelbeschleunigung des Gelenkgehäuses gemessen. Desweiteren werden das auf die Kugel des Kugelzapfens übertragene Reaktionsmoment und die daraus resultierende Winkelbeschleunigung erfasst (s. Abbildung 2). Für ersteres werden Halbleiter-Dehnungsmessstreifen eingesetzt, die eine sehr viel höhere Empfindlichkeit als herkömmliche Dehnungsmessstreifen aufweisen. Die Winkelbeschleunigung der Kugel wird über einen einachsigen Beschleunigungsaufnehmer gemessen.

In Abbildung 3 sind zwei Messungen für unterschiedlich große Verdrehwinkel der Grundanregung im Zeitbereich abgebildet. Bei kleinen Verdrehwinkeln (links) wirkt das Reaktionsmoment (grün) der harmonischen Auslenkung (schwarz) phasengleich entgegen. Wird der Verdrehwinkel vergrößert (rechts), verändert sich das Schwingverhalten grundlegend. Das Reaktionsmoment eilt der Auslenkung um neunzig Grad voraus und beide Größen haben keinen sinusförmigen Verlauf mehr. Das Moment erreicht im

Bereich des Nulldurchgangs des Verdrehwinkels, wo die Winkelgeschwindigkeit am größten ist, sein Maximum.

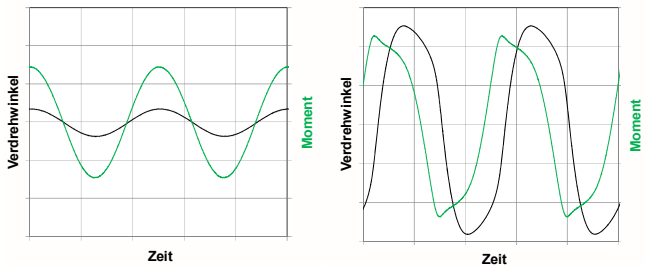


Abbildung 3: Messungen für zwei unterschiedliche Verdrehwinkel (schwarz) am Gehäuse und resultierendes Reaktionsmoment am Kugelpapfen (grün) im Zeitbereich.

Betrachtet man die in Abbildung 3 dargestellten Größen im Moment-Winkel-Diagramm (s. Abbildung 4), wird das unterschiedliche Gelenkverhalten deutlich. Im linken Diagramm beschreibt die Messkurve näherungsweise eine Gerade, woraus sich ein linear-elastisches Bauteilverhalten ableiten lässt [1] und somit keine Relativverschiebung im Gleitspalt auftritt. Im rechten Diagramm zeigt die Messkurve einen Hystereseverlauf, dessen Flanken jeweils über Geraden angenähert werden können.

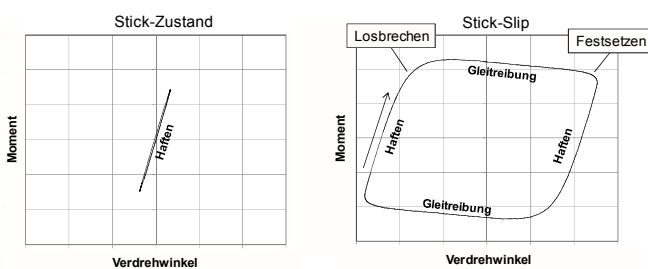


Abbildung 4: Messkurven im Stick-Zustand (links) und bei Stick-Slip-Verhalten (rechts) im Moment-Winkel-Diagramm.

Im Zustand Haften (Stick) steigt das Moment mit zunehmendem Verdrehwinkel bis zu einem maximalen Wert linear an und bleibt anschließend in der Phase der Gleitreibung (Slip) näherungsweise konstant.

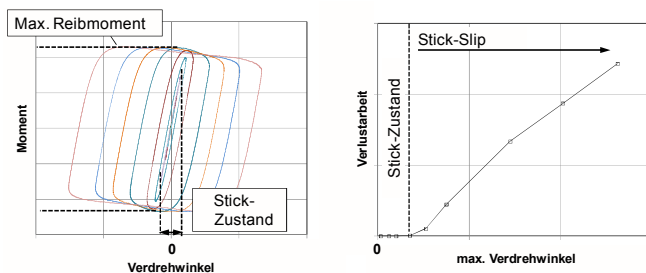


Abbildung 5: Messkurven variiert Gelenkverdrehwinkel (links) und normierte Verlustarbeit über dem maximalen Gelenkverdrehwinkel (rechts).

Abbildung 5 zeigt den Verlauf von einzelnen Messkurven (links) für kontinuierlich vergrößerte Verdrehwinkel, um den Übergang zwischen Stick-Zustand und Stick-Slip-Verhalten zu verdeutlichen. Der Flächeninhalt der abgebildeten Hysteresekurven, der als normierte Verlustarbeit dargestellt ist, verbleibt bis zu einem bestimmten maximalen

Verdrehwinkel nahe Null, bevor er linear ansteigt und damit den Übergang in das Stick-Slip-Verhalten markiert (rechts).

In Abbildung 6 sind Messkurven bei Grundanregung mit und ohne akustisch relevanter Überlagerung abgebildet. Im Vergleich zu der Kurve ohne akustisch wirksame Anregung (blau) bleiben Stick- und Slip-Zustände bei überlagerter Anregung nahezu unverändert (links).

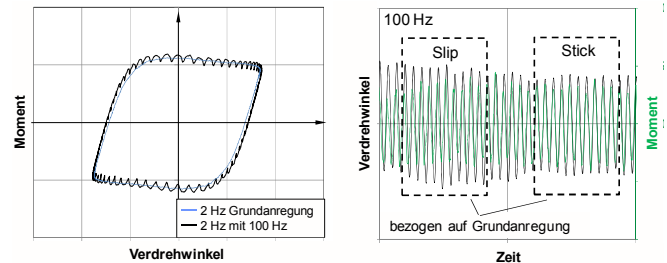


Abbildung 6: Messkurven bei Grundanregung mit 2 Hz mit und ohne akustisch relevanter Überlagerung (links) und Hochpass gefiltertes Signal der überlagerten Anregung einer halben Periode im Zeitbereich (rechts).

Im Zustand des Haftens lässt sich auch aus Verlauf von Verdrehwinkel (schwarz) und Moment (grün) der akustischen Anregung in Abbildung 6 (rechts) auf linear-elastische Eigenschaften schließen. Die aus der Steigung der Messkurve im Moment-Winkel-Diagramm ermittelte Gelenkdrehsteifigkeit im Stick-Zustand ist frequenzunabhängig und stimmt mit der abgeleiteten Steifigkeit aus dem Hochpass gefilterten Signal im akustisch wirksamen Frequenzbereich überein. Während der Gleitreibungsphase (Slip) tritt ein Phasenversatz von neunzig Grad zwischen Verdrehwinkel und Moment der akustisch relevanten Überlagerung auf, welcher analog zur Betrachtung der reinen Grundanregung, auf Reibung und Dämpfung zurückzuführen ist (s. Abbildung 6, rechts).

3. Zusammenfassung

Die dynamischen Gelenkeigenschaften sind maßgeblich abhängig von der Grundanregung. Bei hinreichend kleinen Verdrehwinkeln der Grundanregung, bricht das Gelenk nicht los und hat bis in den akustisch wirksamen Frequenzbereich näherungsweise linear-elastische Eigenschaften. Ab einem bestimmten Verdrehwinkel bzw. Moment tritt Stick-Slip-Verhalten auf, das sich auf das Schwingungsverhalten im akustisch relevanten Frequenzbereich auswirkt. Abhängig vom Zustand, ist eine hohe Drehsteifigkeit und geringe Dämpfung in der Stick-Phase oder eine niedrige Drehsteifigkeit bei gleichzeitig hoher Dämpfung in der Slip-Phase für die akustisch relevante Schwingung wirksam. Ein durchgängiger Slip-Zustand konnte bei strassenähnlicher Anregung nicht beobachtet werden.

Die Ergebnisse aus dem Versuch können dazu beitragen, das nichtlineare Bauteilverhalten in der Gelenkmodellierung realitätsnah zu implementieren.

Literatur

- [1] J. Rösler, H. Harders, M. Bäker: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006.