

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik  
Universität Stuttgart

RESEARCH

Thomas Stietz

# Bewegungsverhalten von Kugelgelenken in Fahrzeugachsen im akustisch relevanten Frequenzbereich



---

# **Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart**

## **Reihe herausgegeben von**

M. Bargende, Stuttgart, Deutschland

H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland

J. Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten.

Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen.

Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose.

Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal.

Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

**Reihe herausgegeben von**

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende  
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe,  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann  
Lehrstuhl Kraftfahrwesen,  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss  
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik,  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13535>

---

Thomas Stietz

# Bewegungsverhalten von Kugelgelenken in Fahrzeugachsen im akustisch relevanten Frequenzbereich

 Springer Vieweg

Thomas Stietz  
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2017

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart  
ISBN 978-3-658-21267-4 ISBN 978-3-658-21268-1 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-21268-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart im Fachbereich Fahrzeugakustik und -schwingungen.

Ich möchte mich an erster Stelle bei meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann, für die Betreuung dieser Arbeit bedanken. Durch seine wertvollen und konstruktiven Ratschläge hat er wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Prof. Dr. rer. nat. Ludger Dragon danke ich ganz herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Mein ganz besonderer Dank gilt Dr. rer. nat. Reinhard Blumrich und Dr.-Ing. Martin Helfer für die Betreuung und Unterstützung, sowie für das Schaffen einer angenehmen Arbeitsumgebung während der gesamten Bearbeitungszeit.

Außerdem danke ich Herrn Dr.-Ing. Schulze-Fehrenbach der Daimler AG, der dieses Forschungsprojekt ermöglicht und begleitet hat. Des Weiteren danke ich Herrn Sachse und Herrn Möller für die konstruktive Zusammenarbeit.

Insbesondere möchte ich meinem Vater Maximilian Jeglitzka für seine zuverlässige und ausdauernde Unterstützung danken.

Auch danke ich den Studierenden, die mich im Rahmen ihrer Abschluss- und Studienarbeiten durch die Durchführung der notwendigen Untersuchungen unterstützt haben.

Schließlich gilt mein Dank meiner Familie und meinen Freunden, die mir in der Endphase dieser Arbeit tatkräftig zur Seite standen.

Stuttgart

Thomas Stietz

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| Vorwort .....  | V         |
| Abbildungsverzeichnis .....                          | IX        |
| Tabellenverzeichnis .....                            | XV        |
| Abkürzungsverzeichnis .....                          | XVII      |
| Zusammenfassung .....                                | XXI       |
| Abstract .....                                       | XXV       |
| <br>   |           |
| <b>1 Einleitung .....</b>                            | <b>1</b>  |
| <br>   |           |
| <b>2 Stand der Technik .....</b>                     | <b>3</b>  |
| <br>   |           |
| <b>3 Theoretische Grundlagen .....</b>               | <b>7</b>  |
| 3.1 Funktion von Fahrwerksgelenken .....             | 7         |
| 3.2 Aufbau von Fahrwerksgelenken .....               | 11        |
| 3.3 Reibungsarten .....                              | 15        |
| 3.4 Modellierung reibungsbehafteter Systeme .....    | 18        |
| 3.5 Strukturodynamik linearer Systeme .....          | 23        |
| 3.6 Rheologische Modellbildung .....                 | 26        |
| 3.7 Dämpfungsmechanismen .....                       | 28        |
| 3.8 Rheologie von Schmierstoffen .....               | 29        |
| 3.9 Systemanregung .....                             | 31        |
| <br>   |           |
| <b>4 Versuchsaufbau .....</b>                        | <b>33</b> |
| 4.1 Anforderungen an den Versuchsstand .....         | 34        |
| 4.2 Aufbau und Funktion des Gelenkprüfstands .....   | 39        |
| 4.3 Aufbau und Anforderungen an die Prüfelenke ..... | 44        |

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.4      | Versuchsablauf.....   | 49        |
| 4.5      | Fehlerbetrachtung .....                                       | 52        |
| <b>5</b> | <b>Analyse und Diskussion der Messergebnisse .....</b>        | <b>55</b> |
| 5.1      | Gelenkverhalten bei Grundanregung .....                       | 55        |
| 5.2      | Einfluss der Gelenkbauart bei Grundanregung .....             | 61        |
| 5.3      | Einfluss der Gelenkvorspannung .....                          | 64        |
| 5.4      | Einfluss des Versuchsaufbaus auf die Messergebnisse.....      | 65        |
| 5.5      | Gelenkverhalten im akustisch relevanten Frequenzbereich ..... | 67        |
| 5.6      | Grundanregung mit akustisch relevanter Überlagerung.....      | 69        |
| <b>6</b> | <b>Numerische Betrachtung .....</b>                           | <b>77</b> |
| 6.1      | Aufbau des Simulationsmodells .....                           | 78        |
| 6.2      | Validierung der Simulationsergebnisse bei Grundanregung.....  | 82        |
| 6.3      | Validierung im akustisch relevanten Frequenzbereich .....     | 85        |
| <b>7</b> | <b>Schlussfolgerung und Ausblick .....</b>                    | <b>91</b> |
|          | Literaturverzeichnis .....                                    | 93        |
|          | Anhang .....  | 99        |

# Abbildungsverzeichnis

|                        |   |    |
|------------------------|---|----|
| <b>Abbildung 3.1:</b>  | Radaufhängung einer Mehrlenkervorderachse .....   | 7  |
| <b>Abbildung 3.2:</b>  | Kugelgelenke einer Mehrlenkervorderachse.....   | 9  |
| <b>Abbildung 3.3:</b>  | Richtungsabhängige Kräfte auf ein Gelenk im Lastfall kippen .....   | 9  |
| <b>Abbildung 3.4:</b>  | Ergebnis einer Gelenkvermessung nach AK-LH 14 .....   | 11 |
| <b>Abbildung 3.5:</b>  | Kippbewegung (a) und Drehbewegung (b) des Kugelzapfens um den Kugelmittelpunkt.....   | 13 |
| <b>Abbildung 3.6:</b>  | Aufbau eines Kugelgelenks im Federlenker .....  | 14 |
| <b>Abbildung 3.7:</b>  | Gegenüberstellung der Schalenkonstruktionen von Traggelenk (links) und Führungsgelenk (rechts) .....  | 14 |
| <b>Abbildung 3.8:</b>  | Reibungskraft $FR$ zwischen zwei Oberflächen mit einer Normalkraft $FN$ und einer Relativgeschwindigkeit $w$ .....  | 17 |
| <b>Abbildung 3.9:</b>  | Reibkoeffizient in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit zwischen zwei Reibpartnern .....   | 17 |
| <b>Abbildung 3.10:</b> | Reibungskraft $FR$ als Funktion der Verschiebung $x$ und der Geschwindigkeit $\dot{x}$ für das Dahl-Modell.....   | 19 |
| <b>Abbildung 3.11:</b> | Reibkontakt zwischen zwei Oberflächen mit der Relativgeschwindigkeit $w$ , modelliert über einzelne Borsten mit einer Steifigkeit. Untere Borsten sind ideal steif..... | 20 |
| <b>Abbildung 3.12:</b> | Ungedämpfter Einmassenreibschwinger.....  | 21 |
| <b>Abbildung 3.13:</b> | Schematische Darstellung der Schaltbedingung für die Zustandsänderung vom Haft- in den Gleit-zustand .....  | 23 |
| <b>Abbildung 3.14:</b> | Zeitlicher Verlauf der Bewegungsgrößen im Falle einer harmonischen Bewegung .....   | 25 |
| <b>Abbildung 3.15:</b> | Rheologische Grundmodelle; (a) Hooke-Modell, (b) Newton-Modell, (c) St.-Venant-Modell.....  | 26 |

---

|                        |   |    |
|------------------------|---|----|
| <b>Abbildung 3.16:</b> | Ermittlung der Drehsteifigkeit aus einer Hysteresekurve durch lineare Regression .....  | 27 |
| <b>Abbildung 3.17:</b> | Scherströmung zwischen parallelen Platten bei Relativbewegung.....  | 29 |
| <b>Abbildung 3.18:</b> | Schubspannung $\tau$ für Newtonsche und Nicht-Newtonsche Fluide.....  | 30 |
| <b>Abbildung 4.1:</b>  | Schematische Darstellung der Vorgehensweise.....  | 33 |
| <b>Abbildung 4.2:</b>  | Leistungsspektrum von gemessener Beschleunigung am Radträger und daraus berechneter Auslenkung in vertikaler Richtung bei Fahrt über Rauasphalt.....    | 36 |
| <b>Abbildung 4.3:</b>  | Überwiegend (blau) und häufig (gelb) auftretende Gelenkverdrehwinkel in Abhängigkeit vom Federweg für Aufbauschwingungen bei Mikrostucker-Anregung..... | 37 |
| <b>Abbildung 4.4:</b>  | Überwiegend (grün) und häufig (rot) auftretende Gelenkverdrehwinkel in Abhängigkeit vom Federweg bei Anregung mit der Radeigenfrequenz.....             | 38 |
| <b>Abbildung 4.5:</b>  | Lagerung des Drehschwingers zur Gelenkaufnahme über eingespannte Speichenfedern.....  | 39 |
| <b>Abbildung 4.6:</b>  | Eigenfrequenzen des Prüfstands in Abhängigkeit von der eingestellten Rotationssteifigkeit und interpolierte Prüfstandskennlinie .....                   | 40 |
| <b>Abbildung 4.7:</b>  | Schnittdarstellung des Prüfstandsbaus mit den einzelnen Komponenten und Positionen der Sensoren.....  | 41 |
| <b>Abbildung 4.8:</b>  | Versuchsaufbau mit zwei elektrodynamischen Shakern .....  | 43 |
| <b>Abbildung 4.9:</b>  | Schnittmodell eines Tragprüfgelenks.....  | 45 |
| <b>Abbildung 4.10:</b> | Normalverteilung des Reibkippmoments von Serien-Führungsgelenken mit einer Drucklast von 0 kN .....   | 45 |
| <b>Abbildung 4.11:</b> | Schnittdarstellung des Führungsprüfgelenks .....  | 47 |
| <b>Abbildung 4.12:</b> | FEM-Simulation der Mises-Vergleichsspannungsverteilung im Kugelzapfen aufgrund eines eingeleiteten Moments um den Kugelmittelpunkt .....                | 47 |

---

|                        |   |    |
|------------------------|---|----|
| <b>Abbildung 4.13:</b> | Messkugelpapfen mit applizierten Halbleiter-Dehnungsmessstreifen .....  | 48 |
| <b>Abbildung 4.14:</b> | Mit FEM berechnete Verteilung der radialen Druckspannung zwischen Kugelschale, die aus der Montagevorspannung resultiert.....   | 49 |
| <b>Abbildung 4.15:</b> | Mit Schmierfett benetzter Kugelpapfen (links) und entsprechend benetzte Kugelschale (rechts) .....  | 50 |
| <b>Abbildung 4.16:</b> | Signalverlauf von Gelenkverdrehwinkel (a) und Moment (b) im Zeitabschnitt $\Delta t = 0,01$ s einer Messung bei 2 Hz Grundanregung.....                                 | 53 |
| <b>Abbildung 5.1:</b>  | Vergleich zwischen Eingangs- und Ausgangssignal eines FG-Prüflings bei Anregung mit kleinen (li.) und großen (re.) Verdrehwinkeln bei harm. Grundanregung mit 2 Hz..... | 56 |
| <b>Abbildung 5.2:</b>  | Vergleich zwischen Messungen bei Anregung mit kleinen (links) und großen (rechts) Verdrehwinkeln bei harm. Grundanregung mit 2 Hz (FG-Prüfgelenk)....                   | 57 |
| <b>Abbildung 5.3:</b>  | Darstellung des resultierenden Moments über dem Verdrehwinkel bei harmonischer Grundanregung mit 14 Hz (FG-Prüfgelenk).....   | 58 |
| <b>Abbildung 5.4:</b>  | Verdrehwinkelverlauf des Gelenkgehäuses und die daraus abgeleitete Winkelgeschwindigkeit bei 14 Hz Grundanregung innerhalb einer Periode (FG-Prüfgelenk).....           | 58 |
| <b>Abbildung 5.5:</b>  | Verlauf von Verdrehwinkel und Moment für schrittweise vergrößerte Anregungsamplituden bei 14 Hz eines FG-Prüfgelenks .....  | 59 |
| <b>Abbildung 5.6:</b>  | Normierte Verlustarbeit eines TG-Prüfgelenks in Abhängigkeit vom Betrag der Verdrehwinkelamplitude für eine 2 Hz und 14 Hz Anregung. ....                               | 60 |
| <b>Abbildung 5.7:</b>  | Resultierende Momente für variierte maximale Gelenkverdrehwinkel eines TG-Prüfgelenks und eines FG-Prüfgelenks für eine 14 Hz Anregung.....                             | 61 |

- Abbildung 5.8:** Resultierende Momente für variierte maximale Gelenkverdrehwinkel eines reibungsoptimierten Prüfgelenks bei 2 Hz (links) und 14 Hz (rechts)..... 63
- Abbildung 5.9:** Maximal auftretende Momente von einem Trag- (TG), Führungs- (FG) und reibungsoptimierten Prüfgelenk (Opt) bei einer Verdrehwinkelamplitude von  $0,06^\circ$  ..... 64
- Abbildung 5.10:** Gegenüberstellung von Verdrehwinkeln und resultierenden Momenten mit Soll- (li.) und max. zulässiger Montagevorspannung (re.) bei 2 Hz..... 65
- Abbildung 5.11:** Maximal auftretendes Reibmoment am Kugelzapfen für fünf Messreihen nach Zerlegen und anschließendem Zusammenbau des Tragprüfgelenks.... 66
- Abbildung 5.12:** Max. Reibmoment über der lin. Drehsteifigkeit in der Haftphase für unterschiedliche Prüfgelenke und numerisch berechnete Drehsteifigkeit des Kugelzapfens (gestr. Linie) ..... 67
- Abbildung 5.13:** Abklingverhalten eines Tragprüfgelenks bei Impulsanregung; gesamtes Signal (links), vergrößerter Bereich bei Eintritt des Impulses (rechts) ..... 68
- Abbildung 5.14:** Ausschnitt von Eingangssignal und Antwortverhalten des Gelenkprüflings bei Anregung mit 140 Hz-Sinus ..... 68
- Abbildung 5.15:** Vergleich zwischen Messkurven bei 2 Hz Grundanregung mit (schwarz) und ohne Körperschall-Überlagerung bei 90 Hz (blau)..... 69
- Abbildung 5.16:** Vergleich zwischen Messkurven bei 14 Hz Grundanregung mit (schwarz) und ohne Körperschall-Überlagerung bei 90 Hz (blau)..... 70
- Abbildung 5.17:** Verdrehwinkel (schwarz) und resultierendes Moment (grün) bei 2 Hz + 140 Hz Anregung (links); 140 Hz Schwingung nach Einsatz eines Hochpassfilters (rechts) ..... 71
- Abbildung 5.18:** Verdrehwinkel und resultierendes Moment der 140 Hz Schwingung während des Haftzustands

|                        |   |    |
|------------------------|---|----|
|                        | (links) und der Gleitphase (rechts);<br>Anregungssignal: 2 Hz + 140 Hz.....   | 72 |
| <b>Abbildung 5.19:</b> | M, $\varphi$ -Darstellung der 140 Hz Schwingung während einer Periode der Grundanregung (2 Hz); Anteile von $\varphi$ und M der Grundanregung über Hochpassfilter herausgerechnet ..... | 73 |
| <b>Abbildung 5.20:</b> | Verdrehwinkel (schwarz) und Moment (grün) bei 14 Hz + 140 Hz Anregung (li.); 140 Hz Schwingung ohne tieffrequente Anteile nach Einsatz eines Hochpassfilters (re.).....                 | 74 |
| <b>Abbildung 5.21:</b> | M, $\varphi$ -Darstellung der 140 Hz Schwingung während mehrerer Perioden der 14 Hz-Grundanregung; Gestrichelte Linien verdeutlichen die Lagen für Haften und Gleiten.....              | 74 |
| <b>Abbildung 5.22:</b> | Messsignale bei simultaner Grundanregung mit 2 Hz und 14 Hz, sowie überlagerter Anregung mit 140 Hz; gestrichelte Linie: harmonischer 2 Hz Verlauf .....                                | 75 |
| <b>Abbildung 5.23:</b> | Ausschnitt der Messsignale bei simultaner Grundanregung mit 2 Hz und 14 Hz, sowie überlagerter Anregung mit 140 Hz; markierte Umläufe: 14 Hz Hystereskurven.....                        | 76 |
| <b>Abbildung 6.1:</b>  | Umfang des Simulationsmodells und Eingangsgrößen für die Zustandsbestimmung .....   | 77 |
| <b>Abbildung 6.2:</b>  | Rheologisches Modell des Prüfstands mit Gelenk.....   | 79 |
| <b>Abbildung 6.3:</b>  | Parameter und rheologischer Aufbau des Gelenkmodells .....  | 79 |
| <b>Abbildung 6.4:</b>  | Gelenkverdrehwinkel und Reaktionsmoment bei Grundanregung mit 2 Hz im Zeitbereich (links) und im M, $\varphi$ -Diagramm (rechts); TG-Prüfgelenk.....                                    | 82 |
| <b>Abbildung 6.5:</b>  | Gelenkverdrehwinkel und Reaktionsmoment bei Grundanregung mit 14 Hz im Zeitbereich (links) und im M, $\varphi$ -Diagramm (rechts); TG-Prüfgelenk.....                                   | 83 |
| <b>Abbildung 6.6:</b>  | Vergleich von Simulation und Versuch. Gelenkverdrehwinkel und Reaktionsmoment bei   |    |