



## Veranstaltungsort:

Heinz Nixdorf MuseumsForum  
Fürstenallee 7, 33102 Paderborn

- **Mechatronische Produkte**  
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Ressourceneffizienz**  
(Energie, Material, ...)
- **Automatisierte Mobilität**  
(Konzepte, Modelle, Sensorik)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**  
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**  
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**  
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**  
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Smarte Aktoren**  
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Serienfertigung mechatronischer Produkte**  
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)

**[www.VDI-Mechatroniktagung.de](http://www.VDI-Mechatroniktagung.de)**

# Halbachsprüfstand zur kinematischen, elastokinematischen und dynamischen Charakterisierung von Radaufhängungen

## Half-axle test rig for the kinematic, elastokinematic and dynamic characterization of wheel suspensions

**M. Sc. Jan Schütte**, Universität Paderborn, Lehrstuhl für Dynamik und Mechatronik, 33098 Paderborn, Deutschland, jan.schuette@uni-paderborn.de

**Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro**, Universität Paderborn, Lehrstuhl für Dynamik und Mechatronik, 33098 Paderborn, Deutschland, walter.sextro@uni-paderborn.de

**Dipl.-Ing. Sergej Kohl**, Universität Paderborn, Lehrstuhl für Dynamik und Mechatronik, 33098 Paderborn, Deutschland, sergej.kohl@uni-paderborn.de

### Kurzfassung

Die Achse als einzige Verbindung zwischen Fahrzeugaufbau und Rad hat die Hauptaufgabe das Rad auf der Straße zu führen. Kinematisch betrachtet übernimmt die Radaufhängung, als Teil der Achse, die Funktion, zwischen Rad und Fahrzeugaufbau einen vertikalen Freiheitsgrad zur Aufnahme von Fahrbahnunebenheiten zu realisieren. Die aus der Radhub- und Elastokinematik resultierenden Radstellungsänderungen bestimmen dabei maßgeblich die Fahrdynamik. Zur objektiven Beurteilung von Radaufhängungen ist eine genaue Charakterisierung der Radhub- und Elastokinematik erforderlich. Daher wurde zur Identifikation der kinematischen, elastokinematischen und dynamischen Radaufhängungseigenschaften am Lehrstuhl für Dynamik und Mechatronik der Universität Paderborn ein Halbachsprüfstand entwickelt. Bei der Auslegung wurde Wert auf ein möglichst breites Einsatzspektrum gelegt. Es können verschiedene Typen von Einzelradaufhängungen in Serien- oder Prototypenkonfiguration am Prüfstand analysiert werden. Er ermöglicht eine Identifikation der dynamischen Radstellungsänderungen unter verschiedenen fahrdynamischen Lastfällen und regellosen Anregungen.

### Abstract

The vehicle axle is the only connection between vehicle body and road. Its main task is to guide the wheel on road. From a kinematic point of view the wheel suspension, as part of vehicle axle, enables a vertical degree of freedom between vehicle body and wheel to cover road excitations. The changes in wheel setting resulting from kinematics and elastokinematics have great impact on driving dynamics. For objective evaluation of wheel suspensions a detailed characterisation of kinematics and elastokinematics is needed. Thus, for identification of kinematic, elastokinematic and dynamic wheel suspension characteristics, a half-axle test rig has been developed at the Chair of Dynamics and Mechatronics of Paderborn University. To accommodate the analysis of for example different types of wheel suspensions in series or prototype configuration, a wide range of applications was considered during the test rig design phase. The test rig allows the identification of dynamic changes in wheel setting on different driving load cases and random excitations.

## 1 Einleitung und Motivation

Die Achse als einzige Verbindung zwischen Fahrzeugaufbau und Rad hat die Funktion, das Rad auf der Fahrbahn zu führen und dabei immer einen möglichst robusten Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn sicherzustellen. Kinematisch betrachtet hat die Radaufhängung, als Teil der Achse, die Aufgabe, zwischen Rad und Fahrzeugaufbau einen vertikalen Freiheitsgrad zur Aufnahme von Fahrbahnunebenheiten zu realisieren. Gleichzeitig werden die im Reifenlatsch wirkenden tangentialen Kräfte und Momente am Fahrzeugaufbau abgestützt [1]. Ein Feder- und Dämpfersystem reduziert die durch Fahrbahnregungen induzierten Aufbaubewegungen und gewährleistet grundsätzlich die beiden Hauptziele Fahrsicherheit und Fahrkomfort. Die Fahrsicherheit wird durch geringe Radlastschwankungen erreicht. Ein hoher Fahrkomfort zeichnet sich unter anderem durch geringe Aufbaubeschleunigungen aus [1, 2].

Die räumliche Bewegung des Rades bei Durchfederung und Lenkung (Kinematik) wird durch die Anzahl und Relativanordnung der Kinematikpunkte (Topologie) der Radführungselemente bestimmt. Bei modernen Mehrlenkerachsen durchläuft das Rad eine aus Translation- und Rotation zusammengesetzte Schraubbewegung [2]. Zusätzlich wird diese überlagert durch elastische Verformungen von Strukturkomponenten der Radaufhängung sowie deren elastischen Verbindungselementen, wie z. B. Gummimetall-Lagern (Elastokinematik). Diese Elastizitäten verändern die zwangsläufige kinematische Bewegung und damit die Radstellung, abhängig von der Höhe der am Rad ausgeprägten Kräfte und Momente. Die sich aus der Radhub- und Elastokinematik ergebenden Radstellungsänderungen sind neben der Grundabstimmung des Fahrwerks in der Konstruktionslage von besonderer Bedeutung für das Fahrverhalten [1, 3, 4]. Zur objektiven Beurteilung und Entwicklung neuer Fahrwerksysteme ist demnach eine genaue

Charakterisierung der Radhub- und Elastokinematik bereits in der frühen Entwicklungsphase maßgebend.

Für den Fahrkomfort eines Fahrzeugs sind insbesondere das Schwingungsverhalten aus der Feder- und Dämpferabstimmung der Radaufhängung sowie die Eigenschaften der Lagerungselemente maßgebend. Das Übertragungsverhalten der Struktur- und Lagerungselemente bestimmt, wie am Rad eingeleitete Kräfte und Schwingungen auf den Aufbau weitergeleitet werden. Zusätzlich haben bspw. die ungefederten Massen und Kenngrößen wie Radstand und Spurweite ebenfalls Einfluss auf den Fahrkomfort [1, 3]. Die Bewertung des Fahrkomforts wird üblicherweise am Gesamtfahrzeug anhand unterschiedlicher subjektiver und objektiver Bewertungskriterien vorgenommen [3]. Die komplexen nichtlinearen Wechselwirkungen der Radaufhängungskomponenten untereinander und mit dem Rad haben außerdem Einfluss auf die Ausbildung des Reifenlatssches und damit auf die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn.

Zur Identifikation der Achseigenschaften wurde ein hydraulischer Halbachsprüfstand entwickelt und aufgebaut. Bei der Auslegung des Prüfstands wurde Wert auf ein möglichst breites Einsatzspektrum gelegt. Es können verschiedene Typen von Einzelradaufhängungen in Serien- oder Prototypenkonfiguration am Prüfstand analysiert werden. Der Prüfstand ermöglicht eine Identifikation der dynamischen Radstellungsänderungen unter verschiedenen fahrdynamischen Lastfällen. Darüber hinaus können der Radaufhängung auch regellose Anregungen wie z. B. Fahrbahnunebenheiten aufgeprägt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse am Halbachsprüfstand dienen zum einen der erweiterten Systemanalyse bestehender Radaufhängungen und neu entwickelter Prototypen und zum anderen der Validierung von Simulationsmodellen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden zunächst wichtige Kenngrößen und Begriffe erläutert. Im Anschluss wird der Aufbau des Halbachsprüfstands inklusive verwendeter Sensorik und Aktorik beschrieben. Im nächsten Schritt wird auf die Berechnung von Kenngrößen und die Implementierung eines Matlab-Tools zur Auswertung der Messergebnisse eingegangen. Anschließend wird zur Verifizierung des Prüfstandsaufbaus ein Vergleich zwischen Messergebnissen einer Serien-Halbachse und einem validierten Modell desselben Achssystems präsentiert.

## 2 Kenngrößen und Begriffe

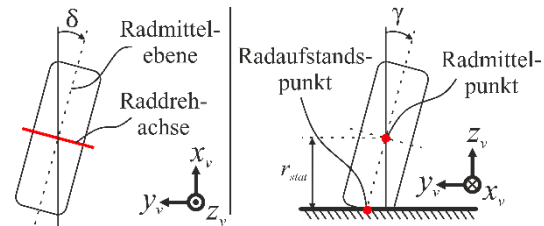
Das Fahrverhalten bzw. die Fahrdynamik und Fahrsicherheit eines Fahrzeugs wird durch verschiedene Kennwerte charakterisiert. Sie beschreiben die relative Stellung des Rades zum Fahrzeugaufbau sowie den Zusammenhang zwischen Vorder- und Hinterachse und linkem und rechtem Rad. Einige Kenngrößen sind

- Spurwinkel  $\delta$ ,
- Sturzwinkel  $\gamma$ ,
- Radstand  $l$ ,
- Spurweite  $s$ ,
- Radhalbmesser  $r_{stat}$ .

Diese Kennwerte ändern sich während des Fahrbetriebs dynamisch in Abhängigkeit der Radhub- und Elastokinematik. Zur Charakterisierung einer Radaufhängung wird

die Änderung der Kenngrößen üblicherweise über die Ursache der Entstehung in einem Diagramm dargestellt. Für die Radhubkinematik werden diese Kurven als Raderhebungskurven bezeichnet.

Die oben genannten Kenngrößen werden in der DIN ISO 8855 definiert und beziehen sich auf das fahrzeugfeste ISO-Koordinatensystem ( $x_v, y_v, z_v$ ). Der Spurwinkel  $\delta$  ist, wie in Bild 1 dargestellt, der Winkel zwischen der Radmittelebene und der  $x_v$ -Achse bei Drehung um die  $z_v$ -Achse. Er wird als positiv definiert und als Vorspur bezeichnet, wenn der vordere Teil des Rades näher an der Fahrzeugmittellinie liegt als der Radmittelpunkt.



**Bild 1** Definition von Spurwinkel  $\delta$  (links) und Sturzwinkel  $\gamma$  (rechts) am linken Rad nach DIN ISO 8855

Als Sturzwinkel  $\gamma$  wird der Winkel zwischen der Radmittelebene und der  $z_v$ -Achse bei Drehung um die  $x_v$ -Achse definiert. Der Sturzwinkel ist negativ, wenn das Rad relativ zum Aufbau oben nach innen geneigt ist, wie im Bild 1 illustriert. Der Radmittelpunkt (wlc) ist der Punkt an dem die Raddrehachse die Radmittelebene schneidet. Der Radaufstandspunkt (wcp) ist der Schnittpunkt der projizierten Raddrehachse mit der Schnittlinie aus Radmittelebene und Fahrbahnebene. Der Radstand  $l$  beschreibt den Abstand zwischen den beiden Radaufstandspunkten einer Fahrzeugseite. Die Spurweite  $s$  ist der Abstand der beiden Radaufstandspunkte einer Achse [5]. Der statische Radhalbmesser  $r_{stat}$  ist als Abstand zwischen Radmittelpunkt und Radaufstandspunkt beim belasteten Rad in der Ruhelage definiert [3].

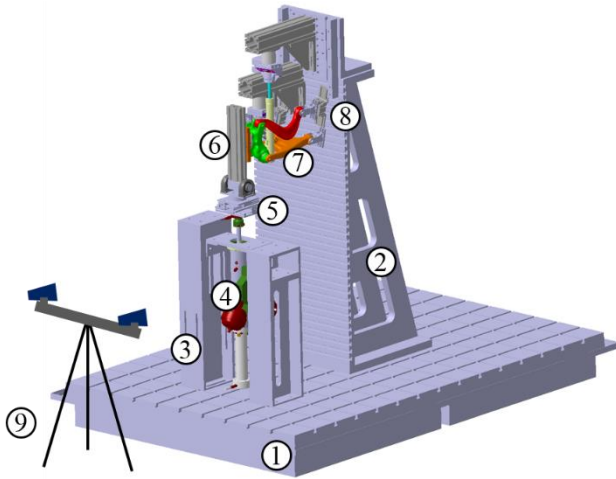
## 3 Prüfstandsaufbau

Der Halbachsprüfstand besteht grundsätzlich aus drei Teilsystemen: Dem mechanischen Aufbau, dem Aktor inkl. Regelung und einem 3D-Kameramesssystem zur Erfassung aller relevanten Bewegungen.

### 3.1 Mechanischer Aufbau

Wie in Bild 2 dargestellt, ist der gesamte Halbachsprüfstand auf einem 2 m x 3 m großen schwingungs isolierten Aufspannfeld (1) montiert. Die Schwingungs isolierung wird durch Membranluftfederelemente mit Zweikammersystem und einstellbarer Luftdämpfung realisiert. Das Bild zeigt den Aufbau für die vertikale Anregung (z-Richtung) zur Analyse der Radhubkinematik. Die aufbauseitigen Anbindungspunkte der Radaufhängungskomponenten werden mit einem massiven Aufspannwinkel (2) verschraubt. Er dient dabei, je nach Konfiguration des Prüfaufbaus, als Ersatz für den Fahrzeugaufbau oder für eine Kombination aus Fahrzeugaufbau und Achsträger. Die Verbindung zwischen Achslenkern und Aufspannwinkel kann über verstellbare Lenkeranbindungen (8) oder einen modifizierten

realen Achsträger erfolgen. Bei einer Konfiguration mit realem Achsträger bleiben die Anbindungspunkte für Aufbaufeder und Schwingungsdämpfer an den Aufspannwinkel variabel. Durch die Verwendung eines realen Achsträgers entspricht die Lage und Orientierung der Lenker derjenigen im realen Fahrzeug. Die verstellbare fahrzeugseitige Lenkeranbindung ermöglicht eine Änderung der Lage von Kinematikpunkten zur schnellen Einflussanalyse auf die Achseigenschaften.

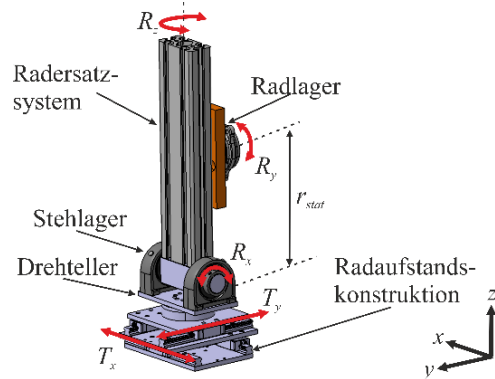


**Bild 2** Halbachsprüfstand zur Analyse der Radhubkinematik

In Bild 2 ist eine Serien-Radaufhängung (7) zur Untersuchung am Prüfstand montiert. Als Rad kann entweder ein reales Reifen-Felge-System oder zur Entkopplung vom Reifeneinfluss ein Radersatzsystem (6) verwendet werden. Das Radersatzsystem bietet die Möglichkeit, den Radhalbmesser  $r_{stat}$  einzustellen, um verschiedene Raddurchmesser zu berücksichtigen. Bei der Auslegung und Fertigung wurden für das Radersatzsystem und die Radaufstandskonstruktion hochfeste Aluminiumlegierungen verwendet, um eine hohe Steifigkeit der Komponenten bei gleichzeitig geringer Rückwirkung auf die Radaufhängung durch zusätzliche ungefederte Masse zu erzielen. Die Anregung wird über einen Hydraulikzylinder (4) aufgeprägt, der mit einem modularen Halterungssystem (3) am Aufspannfeld befestigt ist. Die in Kapitel 2 beschriebenen Kenngrößen werden berührungslos und rückwirkungsfrei mit einem 3D-Kameramesssystem MoveInspect HF der Firma AICON 3D Systems (9) aufgenommen. Die Radaufstandskonstruktion (5) ist mit dem Hydraulikzylinder verbunden. Zusammen mit dem Radersatzsystem werden, wie in Bild 3 dargestellt, zwei translatorische Freiheitsgrade ( $T_x$  und  $T_y$ ) und drei Rotationen ( $R_x$ ,  $R_y$  und  $R_z$ ) realisiert. Die translatorische Bewegung in z-Richtung wird über den hydraulischen Zylinder vorgegeben.

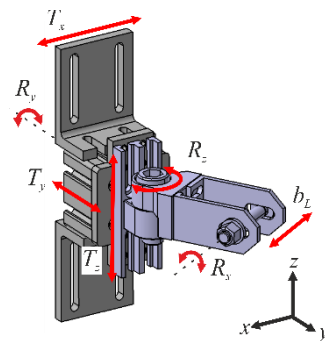
Die zwei translatorischen Freiheitsgrade  $T_x$  und  $T_y$  in der  $x, y$ -Ebene werden über einen kompakten Kreuztisch realisiert. Dieser gewährleistet die aus der Radhubkinematik resultierenden Spurweiten- und Radstandsänderungen. Der Kreuztisch besteht aus drei Platten, welche mit jeweils zwei parallel angeordneten Linearführungen miteinander verbunden sind. Die Linearführungspaare sind um 90 Grad versetzt zueinander angeordnet. Zusätzlich wird über einen Drehteller eine Rotation um die  $z$ -Achse  $R_z$  und damit eine

Spurwinkeländerung ermöglicht. Das Radersatzsystem ist über ein Stehlager mit dem Drehteller verbunden und gewährleistet die Rotationsmöglichkeit  $R_x$  um die  $x$ -Achse, was einer Sturzwinkeländerung entspricht. Über das Radlager bleibt die Drehung des Rades  $R_y$  um die Raddrehachse erhalten.



**Bild 3** Radersatzsystem und Radaufstandskonstruktion

Die verstellbaren Lenkeranbindungen bieten die Möglichkeit beliebige Positionen und Orientierungen von Lagerstellen unterschiedlicher Typen von Radaufhängungen zu adaptieren. Darüber hinaus bieten sie die Option, die Kinematikpunkte der Radaufhängung in Grenzen zu verändern und so die Topologie der Radaufhängung zu variieren. Die Verstellmöglichkeiten sind in Bild 4 illustriert. Darüber hinaus sind die Lenkeranbindungen auf der Spannfläche des Aufspannwinkels frei positionierbar. Die Lenkeranbindungen haben eine hohe Steifigkeit, um den Einfluss aus elastischer Verformung der Anbindungselemente auf die Messergebnisse zu minimieren.



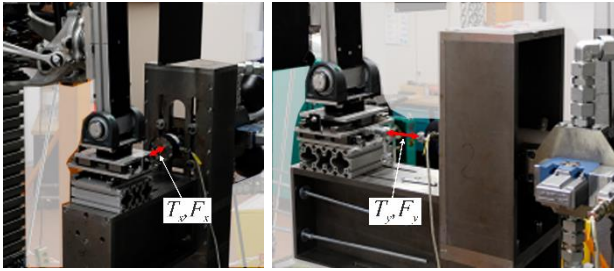
**Bild 4** Variable Lenkeranbindung

Auf diese Weise kann der Einfluss jedes Lagerpunkts auf die gesamte Radhub- und Elastokinematik der Radaufhängung analysiert werden. Darüber hinaus wird durch die Variabilität des gesamten Prüfaufbaus eine Realisierung unterschiedlicher Radaufhängungen ermöglicht. Die räumliche Lage und Orientierung der Lagerungspunkte wird mit dem 3D-Kameramesssystem erfasst. Auf diese Weise sind bereits bekannte Topologien mit der variablen Anbindung am Prüfstand einstellbar.

Zur Analyse des elastokinematischen Achsverhaltens wird der Hydraulikzylinder mithilfe des modularen Halterungssystems in der  $x, y$ -Ebene ausgerichtet. Die Anregung wird an der Radaufstandskonstruktion, entweder in  $x$ - oder  $y$ -Richtung, aufgeprägt. Damit können bspw. die Längs- und Quersteifigkeit einer Radaufhängung untersucht werden.



Beide Prüfstandskonfigurationen sind in Bild 5 dargestellt. Zum Ausgleich von Versatz erfolgt die Kopplung zwischen Hydraulikzylinder und Radaufstandskonstruktion über ein Doppelgelenklager. Bei beiden Konfigurationen kann ein definierter Einfederungszustand, z. B. die Konstruktionslage oder ein bestimmter Belastungszustand, vorgegeben werden. Die Freiheitsgrade der Kombination aus Radersatzsystem und Radaufstandskonstruktion reduzieren sich jeweils um einen translatorischen Freiheitsgrad in Richtung der Anregung. Darüber hinaus können die kinematischen Randbedingungen durch freischalten oder Sperren einzelner Freiheitsgrade variiert werden. Damit ist es möglich verschiedene fahrdynamische Lastfälle, wie bspw. Bremsen oder Antreiben, am Prüfstand abzubilden.



**Bild 5** Halbachsprüfstand zur Analyse der elastokinematischen Radaufhängungscharakteristik mit Anregung in  $x$ -Richtung (links) und  $y$ -Richtung (rechts)

### 3.2 Sensorik und Aktorik

Als Aktor wird eine servohydraulische Prüfeinheit der Firma Hänchen eingesetzt. Er besteht aus einem Hydraulikzylinder, einem Servoventil, einem integrierten Wegsensor und einem Kraftsensor. Die stationäre hydraulische Zentralversorgung setzt sich aus zwei separat betriebenen Axialkolbenpumpen mit einem Volumenstrom von jeweils 70 l/min zusammen. Diese können separat oder parallel mit einem Volumenstrom von 140 l/min bei einem Systemdruck von bis zu 270 bar betrieben werden. Damit können am Prüfstand Kräfte von bis zu 40 kN und Wegamplituden von  $\pm 100$  mm gestellt werden, sodass ein Radhub von 200 mm abgedeckt wird. Neben quasistatischen Lastfällen zur Analyse der Radhub- und Elastokinematik, können der Radaufhängung auch höherfrequente stochastische Signale als Fahrbananregung aufgeprägt werden. Mit dem gesamten hydraulischen Aufbau können Applikationen von bis zu 100 Hz realisiert werden.

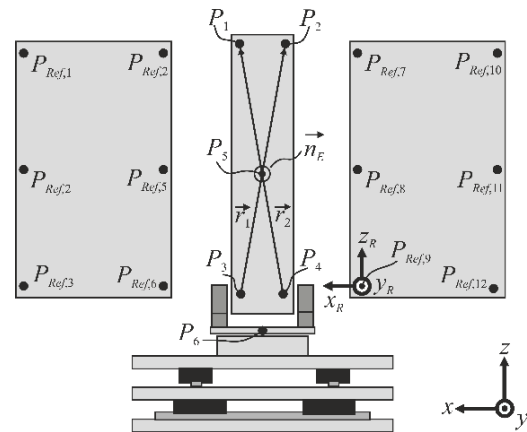
Der Prüfzylinder ist zur Wegregelung mit einem magnetostriktiven Wegsensor zur Erfassung der aktuellen Position der Zylinderkolbenstange ausgestattet. Für den kraftgeregelten Einsatz wird ein Präzisions-Flachprofilkraftaufnehmer eingesetzt. Zur Steuerung und Regelung der Hydraulikeinheit ist im Labor ein Schaltschrank mit embedded-PC von Beckhoff installiert. Die Steuerung wird über eine Mehrachssoftware der Firma Hänchen vorgenommen. In der Software wird gleichzeitig das System überwacht und Messgrößen ausgegeben.

Die räumlich komplexe Radbewegung wird berührungslos und rückwirkungsfrei mit dem 3D-Kameramesssystem MoveInspect HF der Firma AICON 3D Systems aufgenommen. Über einen Trigger sind Messsystem und Hydraulikaktor synchronisiert. Das Kameramesssystem besteht

aus zwei auf einem Träger montierten Hochfrequenzmesskameras mit integriertem LED-Ringblitz. Der Träger ist auf einem Messstativ fixiert und in seiner relativen Position und Orientierung zum Prüfstand variabel. Das Kameramesssystem detektiert mit einer Abtastrate von bis zu 1000 Hz zeitgleich die Lage einer beliebigen Anzahl von Messpunkten in einem definierten Messvolumen. Dabei werden in jedem Zeitschritt  $t$  zu jedem Messpunkt  $P_i$  die Koordinaten  $P_{i,x}$ ,  $P_{i,y}$  und  $P_{i,z}$  erfasst und tabellarisch im ASCII-Format in einem \*.xob-file oder anderen Dateiformaten ausgegeben. Das Kameramesssystem kann grundsätzlich in verschiedenen Konfigurationen mit einer oder mehreren Messkameras verwendet werden.

## 4 Messkonzept und Berechnung

Zur Erfassung der Radstellungsänderung wird das beschriebene 3D-Kameramesssystem verwendet. Der Ursprung des Basis-Koordinatensystems liegt im Sensor einer Messkamera. Allerdings ist aufgrund des variablen Messaufbaus die relative Lage und Orientierung des Messsystems, und damit auch des Basis-Koordinatensystems zum Prüfstand, in der Regel unbekannt. Daher wird ein zusätzliches Referenz-Koordinatensystem ( $x_R$ ,  $y_R$ ,  $z_R$ ) in der Messsoftware definiert. Die Umrechnung in das neue System ist in der Messsoftware integriert. Das System ist als Rechtssystem parallel zum fahrzeugfesten ISO-Koordinatensystem festgelegt. Zur Definition werden 12 Messmarken ( $P_{Ref,i}$ ) verwendet. Diese sind, wie in Bild 6 dargestellt, auf zwei Trägerplatten positioniert. Die Lage des Ursprungs ist ebenfalls der Darstellung zu entnehmen. Er liegt, anders als das ISO-Koordinatensystem, hinter dem Radmittelpunkt.



**Bild 6** Messmarkenpositionierung, Vektoren und Referenz-Koordinatensystem am Halbachsprüfstand

Beide Trägerplatten liegen in einer zum Aufspannwinkel parallelen Ebene und sind in  $y$ -Richtung nahe der Radmittelebene angebracht. Durch die Verwendung von mehr als drei Messmarken zur Definition des Referenzsystems wurde das Messrauschen deutlich reduziert. Zusätzlich reduziert die Verteilung der Messmarken des Referenzsystems auf einer großen Fläche ebenfalls das Messrauschen. Zur Messung der Kenngrößen werden weitere fünf Messmarken ( $P_1$  bis  $P_5$ ) auf dem Radersatzsystem und Eine ( $P_6$ ) auf der Radaufstandskonstruktion angebracht. Die gesamte Messdatenauswertung findet in Matlab statt.

## 4.1 Berechnung

Für die Bestimmung des Spur- und Sturzwinkels am Prüfstand wurde die in Bild 6 dargestellte Anordnung von Messmarken festgelegt. Alle Messgrößen beziehen sich auf das Referenz-Koordinatensystem. Die Berechnung der Spur- und Sturzwinkel basiert auf der Basistransformation mithilfe von elementaren Drehmatrizen. Die Spur- und Sturzwinkel werden als Winkel zwischen der Radmittelebene und der  $x_v$ - bzw.  $z_v$ -Achse definiert (vgl. Kapitel 2). Aus diesem Grund schließt auch jede zur Radmittelebene parallele Ebene dieselben Winkel mit dem fahrzeugfesten Koordinatensystem ein. Demzufolge wird über die auf dem Radersatzsystem angebrachten Messmarken eine zur Radmittelebene parallele Ebene definiert. Mithilfe der beiden Richtungsvektoren  ${}_R\vec{r}_1$  und  ${}_R\vec{r}_2$  auf der äußeren Ebene des Radersatzsystems wird der Normalenvektor  ${}_R\vec{n}_E$  mit

$${}_R\vec{n}_E = {}_R\vec{r}_1 \times {}_R\vec{r}_2 \quad (1)$$

bestimmt. Da  ${}_R\vec{n}_E$  ebenfalls ein Normalenvektor der Radmittelebene ist, wird über seine Richtung die Verdrehung des Rades um den Spur- und Sturzwinkel berechnet. Der Spurwinkel  $\delta$  ist unbekannt und gesucht, daher müssen für seine Bestimmung die Koordinaten von zwei Vektoren bekannt sein. Der erste Vektor ist der aus den gemessenen Koordinaten berechnete Normalenvektor  ${}_R\vec{n}_E$ . Der zweite Vektor  ${}_Z\vec{n}_\delta$  ergibt sich aus der Drehung des Normalenvektors  ${}_R\vec{n}_E$  um den Spurwinkel  $\delta$  in die  $y_R, z_R$ -Ebene des Referenz-Koordinatensystems. Dazu muss  ${}_Z\vec{n}_{\delta,1} = 0$  gelten, sodass für die Drehung die Gleichung (2) folgt

$${}_Z\vec{n}_\delta = {}^Z A_R \vec{n}_E. \quad (2)$$

In Koordinatenschreibweise gilt also

$${}_Z \begin{bmatrix} 0 \\ n_{\delta,2} \\ n_{\delta,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta' & \sin \delta' & 0 \\ -\sin \delta' & \cos \delta' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}_R \begin{bmatrix} n_{E,1} \\ n_{E,2} \\ n_{E,3} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Das Gleichungssystem liefert nach dem Ausmultiplizieren der ersten Zeile die Gleichung

$$0 = n_{E,1} \cos \delta' + n_{E,2} \sin \delta'. \quad (4)$$

Die Gleichung enthält nur die Unbekannte  $\delta'$  und ermöglicht mit  $\tan \delta' = \sin \delta' \cdot \cos^{-1} \delta'$  die Bestimmung des Spurwinkels zu

$$\delta' = \arctan \left( -\frac{n_{E,1}}{n_{E,2}} \right). \quad (5)$$

Gemäß der Vorzeichenkonvention nach [5] gilt

$$\delta = (-1)\delta' \quad (6)$$

Für den Sturzwinkel ist die Vorgehensweise analog, wobei die Drehung um die  $x_v$ -Achse um den Sturzwinkel  $\gamma$  eine weitere Drehmatrix erfordert. Der Normalenvektor  ${}_R\vec{n}_E$  bleibt derselbe. Für den zweiten Normalenvektor  ${}_Z\vec{n}_\gamma$  gilt  ${}_Z\vec{n}_{\gamma,3} = 0$ , sodass dieser in der  $x_R, y_R$ -Ebene liegt. Analog zu (2) bis (4) folgt

$$0 = -n_{E,2} \cos \gamma' + n_{E,3} \sin \gamma', \quad (7)$$

sodass der Sturzwinkel  $\gamma$  in Anlehnung an (5) berechnet werden kann. Aus [5] folgt abschließend ebenfalls eine Anpassung des Vorzeichens zu

$$\gamma = (-1)\gamma'. \quad (8)$$

Die gesamte Berechnung und Auswertung ist in einem Matlab-Tool umgesetzt, welches nachfolgend erläutert wird.

## 4.2 Matlab-Tool

Für eine benutzerfreundliche Messdatenauswertung am Prüfstand wurde ein Matlab-basiertes Tool mit graphischer Benutzeroberfläche (GUI) implementiert. Das Tool bietet die Möglichkeit, alle zur Auswertung notwendigen Messdaten des 3D-Kameramesssystems und des Kraftsensors direkt einzulesen. Intern findet im Anschluss zunächst eine Zuordnung und Sortierung der Messpunkte anhand ihrer relativen Lage zueinander statt. Darüber hinaus werden Spur- und Sturzwinkel berechnet. Nach dem Einlesen können die Daten als \*.mat-file, für eine spätere Verwendung, abgespeichert werden. In vordefinierten Masken zur Visualisierung der Messergebnisse werden die Kenngrößen je nach Anregungsrichtung über den Radhub oder die aufgetragenen Kräfte aufgetragen. Auch hier ist ein Export der aufbereiteten Daten möglich. Darüber hinaus kann die initiale Lage von bspw. Radhub und Sturzwinkel berücksichtigt werden. Eine Filterung der Messdaten ist ebenfalls umgesetzt. Die Filterparameter werden vom Benutzer in der GUI angegeben. Für einen schnellen Vergleich mit anderen Mess- oder Simulationsergebnissen ist in jeder Maske ein Import von Vergleichsdaten möglich.

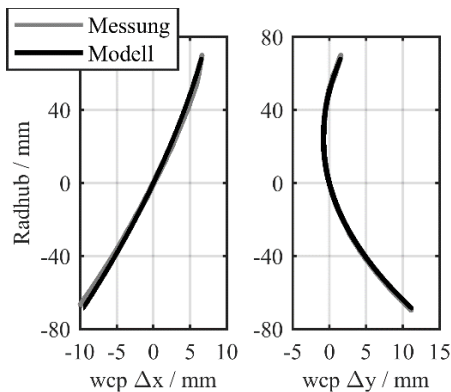
## 5 Systemverifikation

Zur Verifikation des Prüfstands wurde ein Vergleich von Messergebnissen mit Simulationsergebnissen eines Modells derselben Achse durchgeführt. Das Modell wurde bereits zuvor auf Basis von Messungen der Radhub- und Elastokinematik eines Gesamtfahrzeugs validiert. Um sowohl im Modell als auch im Versuch dieselben Randbedingungen herzustellen, wurde das Achsmodell auf die Konfiguration am Halbachsprüfstand angepasst. Dies umfasst bspw. das Vernachlässigen des Wankstabilisators. Darüber hinaus wurde das Modell um die in Bild 3 dargestellte Kombination aus Radersatzsystem und Radaufstandskonstruktion erweitert. Die Erweiterung ist als klassisches Mehrkörpermodell aus Starrkörpern und idealen Gelenken aufgebaut, da aufgrund der hohen Bauteilsteifigkeit der Einzelkomponenten nur unwesentliche Verformungen zu erwarten sind. Darüber hinaus ist durch die Wahl der Messpunkte am Prüfstand vorhandenes Spiel in den Linearführungen der Radaufstandskonstruktion für die Messergebnisse von untergeordneter Bedeutung und wird daher im Modell nicht berücksichtigt. Nachfolgend werden exemplarisch für Anregungen in z-Richtung (Radhub) und y-Richtung (Seitenkraft  $F_y$ ) einige Ergebnisse vorgestellt.

### 5.1 Radhubkinematik

Bei der Untersuchung der Radhubkinematik wird, wie eingangs erwähnt, über eine Wegregelung die Verschiebung

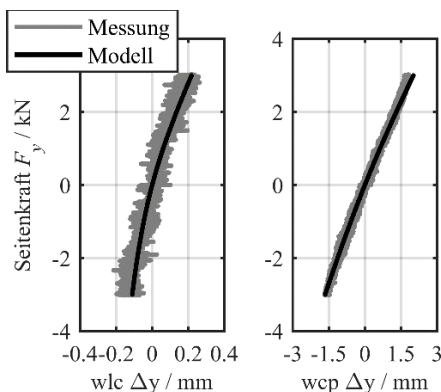
des Radaufstandspunkts (wcp) aufgeprägt. In Simulation und Versuch wurde jeweils eine quasistatische Sinusanregung mit einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Amplitude von 65 mm vorgegeben. In Bild 7 ist die Verschiebung des Radaufstandspunkts in  $x$ - und  $y$ -Richtung über den Radhub aufgetragen. Die linke Darstellung ist für die Halbachskonfiguration am Prüfstand als Äquivalent zu der in Kapitel 2 beschriebenen Radstandsänderung anzusehen. In der rechten Darstellung ist die einseitige Spurweitenänderung dargestellt. In beiden Darstellungen ist eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation gegeben.



**Bild 7** Vergleich der gemessenen und simulierten Verschiebung des Radaufstandspunkts in  $x$ -Richtung (links) und  $y$ -Richtung (rechts)

## 5.2 Elastokinematik

Zur Charakterisierung der Elastokinematik wurden der Halbachse am Prüfstand sowohl Längs- als auch Seitenkräfte aufgeprägt und unter anderem die Verschiebung von Radaufstandspunkt und Radmittelpunkt (wlc) ausgewertet. Es wurde stets eine sinusförmige Kraftanregung mit einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Amplitude von 3 kN gewählt. In Bild 8 sind exemplarisch die gemessenen und simulierten Verschiebungen des Radaufstandspunkts und des Radmittelpunkts über die Seitenkraft abgebildet. Im linken Plot ist zu sehen, dass sich der Radmittelpunkt unter Seitenkraft nur gering verschiebt. Die Verschiebung des Radaufstandspunkts (rechts) ist in etwa um den Faktor 8 größer. In beiden Abbildungen ist eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modell festzustellen.



**Bild 8** Vergleich der gemessenen und simulierten Verschiebung von Radmittelpunkt (links) und Radaufstandspunkt (rechts) unter Seitenkraft

## 6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde der Aufbau, die Funktionsweise und das Einsatzspektrum eines Halbachsprüfstands zur Charakterisierung von Radaufhängungen vorgestellt. Dies umfasst den variablen mechanischen Aufbau des Prüfstands ebenso wie die Wahl eines dreidimensionalen optischen Messverfahrens zur Erfassung wichtiger Kenngrößen einer Radaufhängung. Es wurde auf das Postprocessing der Messdaten eingegangen und ein Matlab-Tool zur Auswertung der Messergebnisse im Labor vorgestellt. Zum Abschluss wurde zur Systemverifikation ein Vergleich von Messergebnissen und Simulationsergebnissen eines validierten Achsmodells gezeigt.

## 7 Literatur

- [1] M. Trzesniowski: *Rennwagentechnik*, 3. Aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2012
- [2] S. Kohl, A. Zuber und W. Sextro: *Benteler Vehicle Dynamics – Fahrdynamikentwicklung basierend auf einer neuen Auslegungstheorie*. In: 8. Tag des Fahrwerks 2012, ika, Aachen, 2012
- [3] B. Heißing, M. Ersoy und S. Gies: *Fahrwerkhandbuch*, 4. Überarbeitete und ergänzte Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg Verlag, 2011
- [4] R. Bosch GmbH: *Kraftfahrzeugtechnisches Taschenbuch*, 29. Überarbeitete und erweiterte Auflage, Karlsruhe, Springer Vieweg Verlag, 2018
- [5] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): *DIN ISO 8855:2013-11 Straßenfahrzeuge – Fahrdynamik und Fahrverhalten – Begriffe (ISO 8855:2011)*, 2013