



KISTLER

measure. analyze. innovate.

Fahrzeug- technik

RoaDyn™ - ein Entwicklungswerkzeug für Felge und Radaufhängung

Dr.-Ing. W. Evers
Kistler Instrumente AG,
Schweiz

Dipl.-Ing. J. Reichel,
TU, DE-Darmstadt

Dipl.-Ing. R. Eisenkolb
Dipl.-Math. (FH) I. Ebhart
Daimler Chrysler AG,
DE-Sindelfingen

RoaDyn^Ô - ein Entwicklungswerkzeug für Felge und Radaufhängung

Dr.-Ing. Wolfgang Evers
Kistler Instrumente AG, CH-Winterthur

Dipl.-Ing. Jochen Reichel
Fachgebiet Fahrzeugtechnik, TU DE-Darmstadt

Dipl.-Ing. Roland Eisenkolb
Dipl.-Math. (FH) Ingo Ebhart
Daimler Chrysler AG, DE-Sindelfingen

Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel beschreibt im ersten Abschnitt die Wirkungsweise und den Aufbau von Radkraft-Dynamometern auf Basis piezoelektrischer Kraftmess-technik. Ein wichtiger Vorteil des Messprinzips liegt in der Möglichkeit die eigentlichen Messstellen der Systeme sehr steif auslegen zu können ohne die hohen Sensivitäten der Sensoren zu verkleinern. Die bei quasistatischen und dynamischen Belastungen auftretenden Verschiebungen innerhalb der Messstellen fallen infolge der äußerst geringen Elastizität und der relativ großen Querschnittsflächen der Piezokristalle sehr gering aus. Hiermit lassen sich die Eigenfrequenzen der Messsysteme in sehr hohe Bereiche (bis 1 kHz) legen, was insbesondere für Prüfstandsmessungen wichtig sein kann. Hierfür wird im anschließenden Abschnitt die Verwendung des Messrades auf Prüfständen zur Auslegung und Untersuchung von Reifen, Felgen und Rad-/Reifenkombinationen beschrieben. Durch die Möglichkeit, das Messsystem universell an nahezu alle Rad/Reifenkombinationen eines Herstellers adaptieren zu können, lassen sich z.B. für Dauerlaufprüfprogramme relevante Belastungszustände an der Einspannstelle zur Radnabe messtechnisch schnell und reproduzierbar überwachen.

Beim Einsatz der Radkraft-Dynamometer im Fahrversuch treten schwingungsdynamische Besonderheiten auf, die der Anwender zu berücksichtigen hat. Kapitel 5 beschreibt daher aus der Sicht eines Anwenders die Randbedingungen die im Fahrversuch zu beachten sind. Hierfür wird ein Versuchsfahrzeug mit einem RoaDyn P650 (technische Daten siehe Tabelle 1) bestückt und auf einer 4-Stempelanlage im fahrdynamisch relevanten Frequenzbereich zu Vertikalschwingungen angeregt. Ziel der Untersuchungen ist die Bestimmung einer Übertragungsfunktion von Kräften im Reifenlatsch zu den gemessenen Kräften mittels des Messfelgensystems im Frequenzbereich. Abschließend werden einige Messergebnisse aufgezeigt, die bei Fahrversuchen aufgezeichnet wurden. Bei den Fahrversuchen wurde das Fahrwerk durch einzelne stoß- und sprungförmige Fahrbahnunebenheiten zu Vertikalschwingungen angeregt.

1 Einleitung

Um den hohen Ansprüchen, die heutzutage an die Fahrsicherheit, die Fahrdynamik und den Komfort gestellt werden, im vollen Umfang gerecht zu werden, erfordert es effiziente Werkzeuge zur Erfassung von Messwerten, die als Eckdaten in die Simulation sowie die Auslegung von Fahrwerk, Antriebsstrang oder Fahrzeugaufbau einfließen. Ein zentrales Element als Bindeglied zwischen Fahrzeug und Fahrbahn bildet hierbei das Rad und dessen Aufhängung mit den spezifischen Feder-Dämpfer-Eigenschaften des Systems. Zur Entwicklung, Verbesserung oder Abstimmung solcher Systeme spielen die in die Struktur eingeleiteten Kräfte und Momente eine wesentliche Rolle. Zur Ermittlung solcher Daten, wie z. B. Radlastverteilung und deren Schwankungen, Radaufstandskraft und damit Seitenführungskraft oder z. B. Ungleichförmigkeitsmessungen in der Reifenentwicklung, stehen unterschiedliche Radkraft-Dynamometer zur Verfügung, sei es für den Einsatz an Versuchsfahrzeugen, an servo-hydraulischen Straßensimulatoren oder an Rollenprüfständen.

Während es sich bei den Straßensimulatoren und den Rollenprüfständen um feststehende Applikationen handelt, rotiert das Messglied beim Einsatz am Versuchsfahrzeug mit dem Rad. Hierdurch ergeben sich völlig unterschiedliche Randbedingungen. Bei Prüfständen spielt in der Regel die durch das Messglied eingebrachte zusätzliche Masse eine untergeordnete Rolle, so dass die geforderte Betriebsfestigkeit durch Anpassung des eingesetzten Werkstoffes immer gewährleistet werden kann.

Am Versuchsfahrzeug ist dagegen das Messglied als ein Bestandteil des Rades anzusehen und sollte daher die Steifigkeit und das Trägheitsmoment des Serienrades sowie die reifengefederte Masse des Fahrwerkes möglichst nicht verändern. Auf der anderen Seite hat die Messfelge sehr hohe mechanische Belastungen auf Dauer zu ertragen, die aus den zu absolvierenden Lastkollektiven unter teilweise härtesten Erprobungsbedingungen resultieren. Dies führt zu einem Zielkonflikt, der nur durch eine sehr anspruchsvolle Konstruktion und deren Optimierung unter Verwendung hochfester Werkstoffe des extremen Leichtbaus gelöst werden konnte.

Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist das jeweils eingesetzte Messprinzip. Für die Radkraft-Dynamometer kommen z. Zt. hauptsächlich zwei unterschiedliche Typen von Aufnehmern zum Einsatz und zwar auf Basis von:

1. Dehnungsmessstreifen (DMS)
2. Piezoelektrischen Materialien

Bei passiven Aufnehmersystemen wie den Dehnungsmessstreifen wird auf die zu messende Kraft indirekt über die Deformation des elastischen Messelementes (z.B. Biegebalken) geschlossen. Daher muss dieses entsprechend nachgiebig gewählt werden, um eine genügend große Empfindlichkeit zu gewährleisten. Vorteilhaft ist jedoch, dass für die DMS-Messtechnik keine untere Grenzfrequenz existiert, was eine rein statische Messung möglich macht. Bei der piezoelektrischen Messtechnik hängt die untere Grenzfrequenz im wesentlichen von der Zeitkonstante bzw. der Drift des Ladungsverstärkers ab. Man spricht daher in diesem Fall von einer quasi-statischen Messung.

Bei piezoelektrischen Kraftaufnehmern ist das Messelement mit dem Aufnehmerelement identisch, so dass dessen Deformation selbst nicht gemessen werden muss und daher um Größenordnungen kleiner gehalten werden kann. Piezoelektrische Aufnehmer zeichnen sich daher durch eine extrem hohe Steifigkeit verbunden mit einer entsprechend hohen Eigenfrequenz aus. Insbesondere sind Steifigkeit und Empfindlichkeit bei entsprechender Auslegung unabhängige Parameter

Durch die Übernahme sämtlicher Aktivitäten der IGeL-Ingenieurgesellschaft für Leichtbau mbH in Schönaich bei Stuttgart per 1. März 2002 sieht sich die Kistler Instrumente AG in der glücklichen Lage beide Technologien für die oben angegebenen Einsatzbereiche aus einer Hand liefern zu können. Des Weiteren soll aber in diesem Beitrag weitestgehend die piezoelektrische Messtechnik dargestellt werden.

2 Piezoelektrische Sensorik

2.1 Der piezoelektrische Effekt

Unter der Piezoelektrizität versteht man eine lineare elektromechanische Wechselwirkung zwischen dem mechanischen und elektrischen Zustand in Kristallen, die kein Symmetriezentrum besitzen [Gautschi]. Die hier vorgestellten Kraftaufnehmer setzen den direkten piezoelektrischen Effekt um, d. h., die durch die Krafteinwirkung hervorgerufene mechanische Deformation des piezoelektrischen Körpers wird von einer der Deformation proportionalen Änderung der elektrischen Polarisation begleitet, wodurch an bestimmten Kristallflächen elektrische Ladungen erzeugt werden. Entsprechend der Ausrichtung der polaren Kristallachsen zu der Wirkungslinie der angreifenden Kraft sind folgende piezoelektrische Effekte zu unterscheiden:

- Longitudinaleffekt,
- Schub- oder Schereffekt und
- Transversaleffekt.

Durch entsprechende Kristallschnitte lassen sich diese Effekte gezielt ausnutzen (siehe Bild 1). So sind z. B. piezoelektrische Aufnehmerelemente, die dermaßen herausgeschnitten werden, dass sie den Longitudinaleffekt zeigen, empfindlich auf Druckkräfte. Entsprechendes gilt für den Schubeffekt in Verbindung mit Scherkräften.

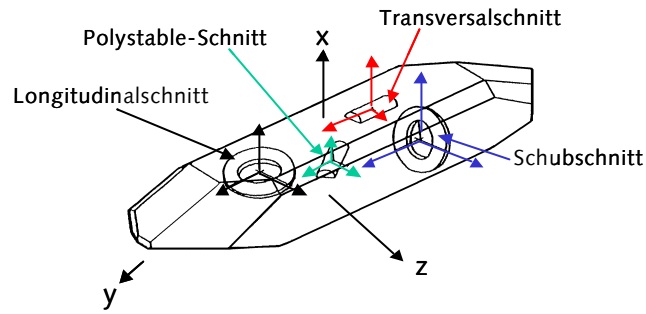


Bild 1: Synthetische Quarzkristalle und daraus geschnittene Ringe (links), mögliche Schnitte (rechts)

2.2 Dreikomponenten-Kraftaufnehmer

Dreikomponenten-Kraftaufnehmer, wie sie in den Sechskomponenten-Radkraft-Dynamometern RoaDyn P625/P650 zur Bestimmung der drei Kraft- und Momentenkomponenten eingesetzt werden, enthalten zur Messung der Normalkomponente ein für den Longitudinaleffekt geschnittenes Quarzplattenpaar und zur Bestimmung der beiden Schubkomponenten je ein für den Schubeffekt geschnittenes Quarzplattenpaar (Bild 2).

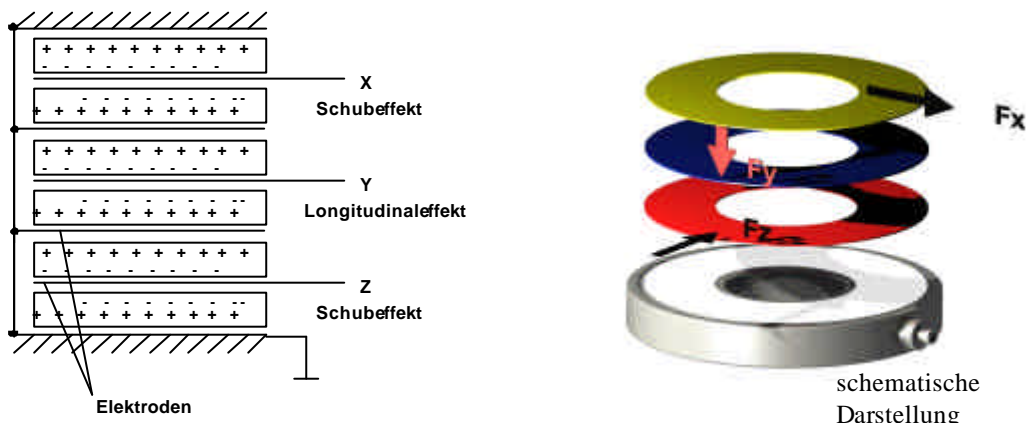


Bild 2: Aufbau eines Dreikomponenten-Kraftaufnehmers.

Um Zug- sowie Schubkräfte -letztere durch Reibung - übertragen zu können, ist es notwendig, die Aufnehmer immer unter einer genügenden mechanischen Vorspannung einzubauen.

Beim Einwirken einer äußeren Kraft geben die Quarzplattenpaare, entsprechend der in ihrer empfindlichen Achse (x, y oder z) wirkenden Kraftkomponente eine der Kraft proportionale Ladung ab. Aufgrund dieser Eigenschaft wird bei Kraftmessungen die Komponententrennung, d.h. die Zerlegung einer beliebig angreifenden Kraft in ihre orthogonalen Komponenten, durch das Messelement ohne den Einsatz zusätzlicher komplexer, mechanischer Konstruktionen erzielt. Die vom Kristall erzeugten Ladungen werden schließlich über Elektroden an den Oberflächen der Kristallscheiben abgegriffen und dem Ladungsverstärker über hochisolierende Verbindungen zugeführt. Der Ladungsverstärker wandelt die Ladungsänderungen durch kapazitive Gegenkopplung in ein der Gesamtladung (bzw. der Gesamtbelastung) entsprechendes, proportionales Spannungssignal um, welches sich problemlos weiterverarbeiten lässt.

Die Dreikomponenten-Kraftaufnehmer zeichnen sich durch folgende Eigenschaften besonders aus:

- Keine Alterung oder Ermüdung der Kristallsensoren.
- Ausgezeichnete Stabilität, d.h. keine Änderung der Empfindlichkeit.
- Hohe Linearität verbunden mit einer sehr hohen Messdynamik, d.h. der Messbereich erstreckt sich über mehrere Zehnerpotenzen, einfach durch entsprechende Messbereichswahl am Ladungsverstärker. In den meisten Applikationen können drei Zehnerpotenzen ohne Schwierigkeiten ausgenutzt werden.
- Hohe Federsteifigkeit mit einer daraus resultierenden hohen Eigenfrequenz des Messelementes.
- Inhärent geringes Übersprechen (d.h. jede Kraftkomponente wird durch eine individuelle Kristallscheibe erfasst) sowie eine geringe Hysterese.
- Kompakte Bauweise.

3 Radkraft-Dynamometer (RoaDyn)

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, lassen sich die Radmessnaben bzw. Radkraft-Dynamometer grob in feststehende sowie rotierende Dynamometer unterteilen.

3.1 Feststehende Applikationen

Seit 1972 werden bei der Kistler Instrumente AG in Winterthur feststehende Radmessnaben RoaDyn P530 (Fixed Wheel Dynamometer) auf Basis von piezoelektrischen Kraftaufnehmern entwickelt. Die dabei eingesetzten Dreikomponenten-Kraftaufnehmer ermöglichen erstmals eine kompakte und leichte Bauart, verbunden mit einer Messfrequenzen bis in den 1 kHz Bereich hinein. Feststehende Radkraft-Dynamometer werden praktisch weltweit in Reifenprüfständen eingesetzt, um z.B. Reifenkennlinien sowie die Eigenschaften wie Gleichförmigkeit, Rollwiderstand, Schräglauf und Spurtreue der Reifen zu messen.

In der Regel werden mit dem RoaDyn P530 die am Reifen angreifenden Kräfte F_x , F_y , F_z gemessen und daraus die Momente M_x und M_z bestimmt. Das Antriebs- oder Bremsmoment M_y , welches bei Messungen mit den rotierenden Radkraft-Dynamometer RoaDyn P625/P650 (Rotating Wheel Dynamometer) eine zentrale Bedeutung einnimmt, wird beim RoaDyn P530 nicht erfasst, da die Grundplatte mit den 4 Dreikomponenten-Kraftaufnehmern über das Wellenende frei drehbar gelagert ist. Die piezoelektrischen Kraftaufnehmer werden mittels hochfester Schrauben zwischen der Grund- und Deckplatte, die letztendlich über den Nabenadapter den Reifen aufnimmt, unter hoher Last vorgespannt, so dass ein sicherer Kraftfluss über die Messglieder sowohl bei Schub- als auch bei negativer Normalkrafteinleitung gewährleistet ist.

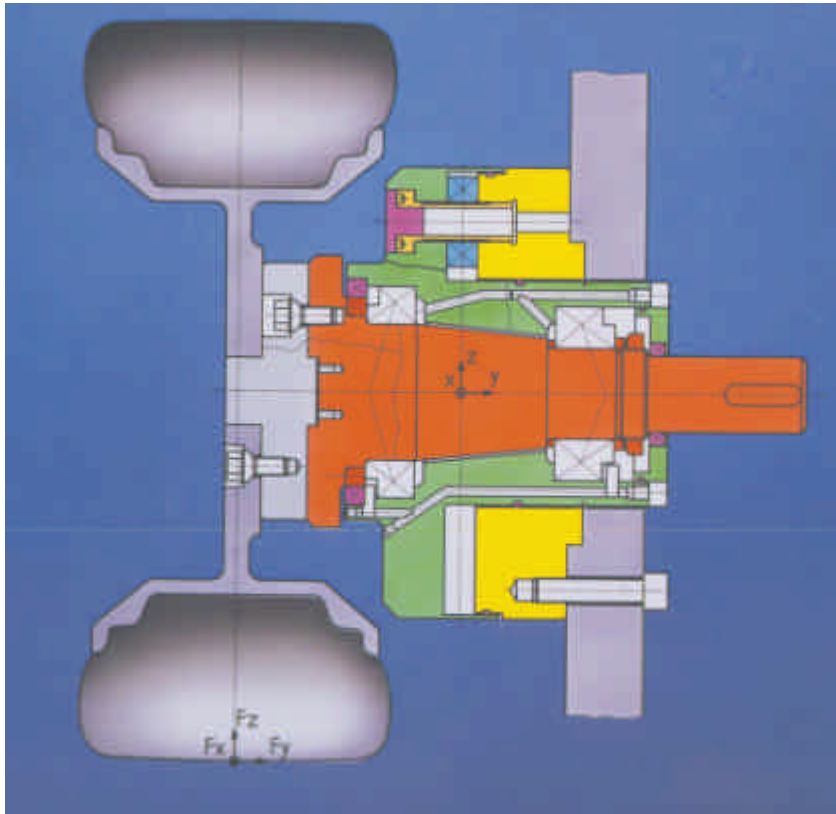


Bild 3: Konstruktiver Aufbau des RoaDyn P530.

Das bisher größte gelieferte RoaDyn P5x0 mit einem Außendurchmesser von ca. 700 mm und einem Gewicht von 540 kg wurde für Kräfte bis zu 90 kN ausgelegt. Diese Radmessnabe findet Anwendung als Messmittel bei der Herstellung und Überprüfung von Reifen für den Schwerlastverkehr.

3.2 Rotierende Applikationen

Für spezielle Anwendungen können auch rotierende Radkraft-Dynamometer RoaDyn P650 auf Rollenprüfständen eingesetzt werden, so dass zusätzlich Relativbewegungen zwischen Reifen und Rolle realisiert werden können. Weiterhin zeichnen sich die Prüfstands-Dynamometer der neuesten Generation dadurch aus, dass der Kunde seine Basisräder (Reifen mit Felge) mit den entsprechenden Design-Varianten problemlos mittels eines Felgenadapters montieren kann. Dies wurde über ein speziell optimiertes Lochbild des eingesetzten Felgenadapters verwirklicht. Hiermit wird gewährleistet, dass Tests an Serienfelgen unbeeinflusst vom Messsystem durchgeführt werden können.

Im Gegensatz zu der Prüfstandsanwendung wird beim Einsatz am Fahrzeug das Messglied direkt in das Rad integriert, d.h. der Felgenstern kann infolge des sehr modularen Aufbaus durch die Messfelge mit Felgen- und Nabenadaption ersetzt werden (Bild 4). Dementsprechend ist die zusätzliche reifengefederte Masse möglichst gering zu halten, sowie die Steifigkeit über die Anbindung dem ursprünglichen Rad anzupassen. Aus diesem Grund ist es erforderlich das Radkraft-Dynamometer in unterschiedlichen Ausführungen anzubieten und zwar für die Bereiche Pkw sowie schwerer Pkw, SUV und leichte Lkw. Der wesentliche Unterschied liegt in den verwendeten Materialien für die in Tabelle 1 angegebenen Lastbereiche. Der Aufbau beider Radkraft-Dynamometer ist identisch, wobei

im Gegensatz zum feststehenden RoaDyn P530 insgesamt 8 vorgespannte Kraftaufnehmer eingesetzt werden. Entsprechend Bild 5 bilden jeweils zwei Kraftaufnehmer mit der Deckplatte, welche die Krafteinleitung über den Felgenadapter sicherstellt, sowie den beiden Grundplatten (innere und äußere), die über den innenliegenden Zwischenring die Verbindung zum Nabenadapter sicherstellen, ein optimales Packaging.

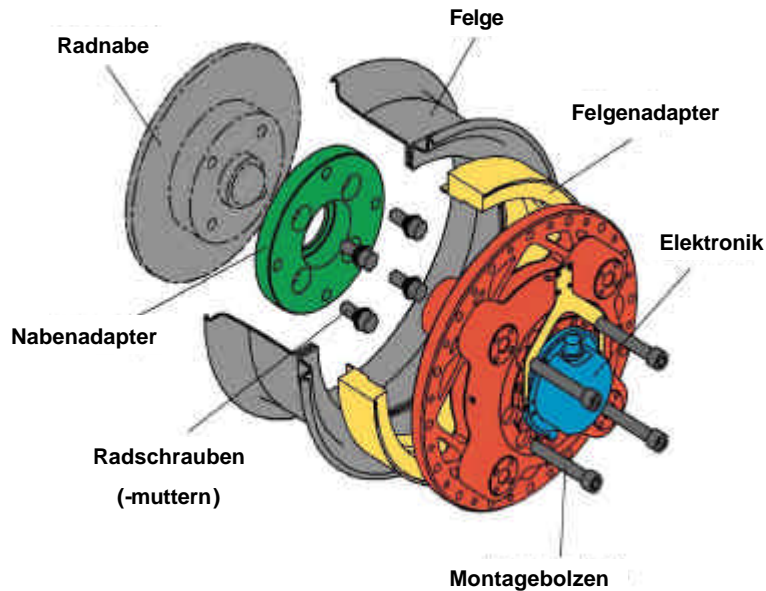


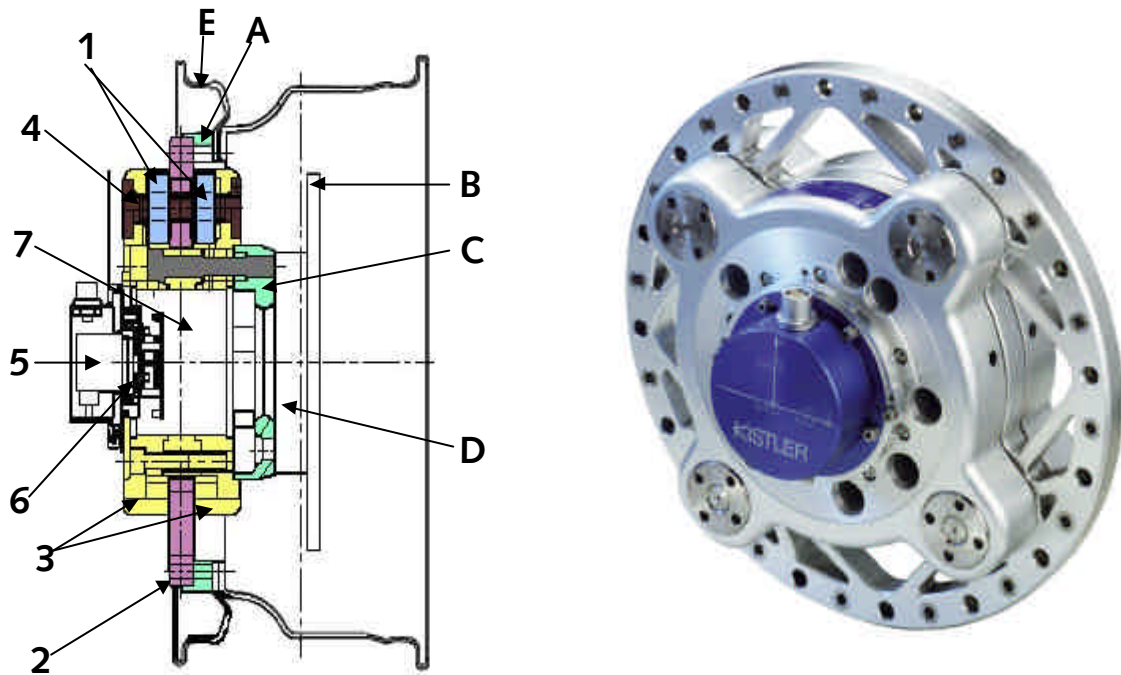
Bild 4: Rotierendes Radkraft-Dynamometer mit Felgen- und Nabenadaption

Über die Vorspannbolzen und -muttern werden die Bauteile unter einer genügend hohen mechanischen Vorspannung verbunden. Die Orientierung der Aufnehmer ist dabei in Normalenrichtung, dies entspricht der y-Koordinate im Radsystem, gegenseitig in Gestalt einer Zug-Druck Formation gewählt, so dass Änderungen der Vorspannung durch z.B. Temperatureinflüsse Idealerweise vollständig ausgeglichen werden.

		RoaDyn P625	RoaDyn P650
F_x (Bereich 1/Bereich 2)	kN	24 / 8	45 / 15
F_y	kN	15 / 5	24 / 8
F_z	kN	24 / 8	45 / 15
M_x	kNm	6 / 2	10 / 3,3
M_y	kNm	6 / 2	10 / 3,3
M_z	kNm	2,5 / 0,8	4,4 / 1,5
Überlast	%	20	20
zus. ungefederte Masse	kg	2,7	6,5
Schutzklasse	-	IP65	IP65
Material Messglied	-	Al / Mg	Al
Material Sensorgehäuse	-	Titan	Stahl

Tabelle 1: Lastbereiche der unterschiedlichen Ausführungen

Die Ladungsverstärker für die Kraftaufnehmer sind in der Radelektronik (Pos. 7, Bild 5) integriert. Das Ausgangssignal des Ladungsverstärkers wird anschließend intern mittels des Signals vom Winkelresolver aus dem rotierenden Koordinatensystem der Kraftaufnehmer in das radbezogene nichtrotierende Koordinatensystem transformiert. Zu diesem Zweck wird der feststehende Teil des Schleifringmoduls (Pos. 5, Bild 5) über einen Bügel am Federbein fixiert. Die Übertragung der Signale auf den nicht rotierenden Teil mit dem Stecker zur Anbindung an die Kontrolleinheit erfolgt über einen Schleifring.



1	Dreikomponenten-Kraftaufnehmer
2	Deckplatte (Verbindung zum Felgenadapter)
3	Grundplatte (Verbindung zum Nabenadapter)
4	Vorspannbolzen und -mutter
5	Schleifringmodul
6	Winkelresolver
7	Radelektronik

A	Felgenadapter
B	Bremsscheibe
C	Nabenadapter
D	Nabe
E	Felge

Bild 5: Aufbau des rotierenden Radkraft-Dynamometers RoaDyn P625/650

4 Prüfstandsapplikation

Während feststehende Radmessnaben praktisch von allen führenden Herstellern in deren Reifenprüfständen eingesetzt werden, kam bei der Daimler Chrysler AG in Sindelfingen erstmals ein rotierendes Radkraft-Dynamometer als Messglied zum Einsatz (siehe Bild 6). Dadurch wird gewährleistet, dass ein gezielter Schlupf zwischen Trommel und Reifen eingestellt werden kann, um z.B. die dabei auftretenden Kräfte und Momente in Form einer Kraftschluss-Schlupf-Kurve aufzutragen. Weitere Anwendungen betreffen die Komponentenprüfung der Räder.

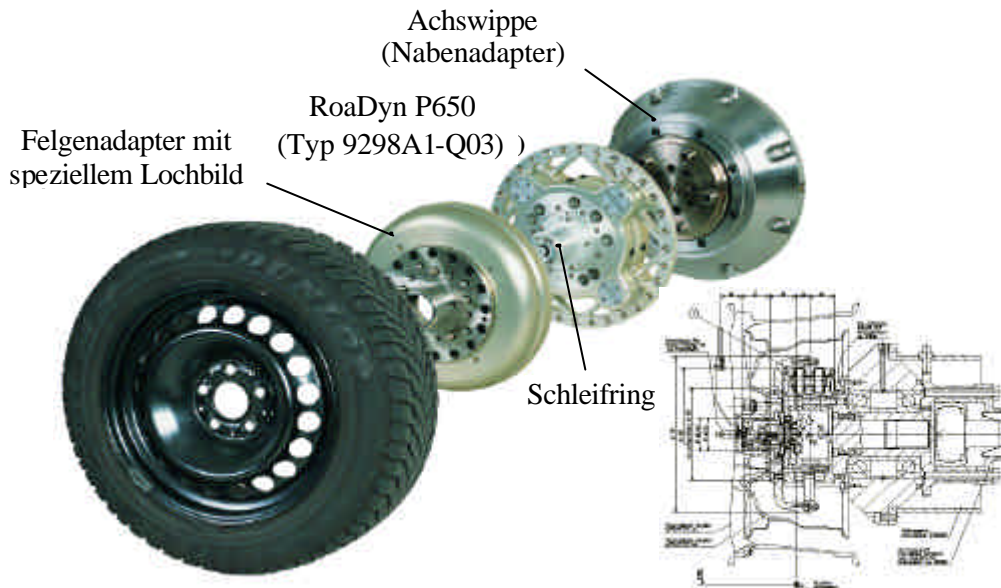


Bild 6: Rotierendes Radkraft-Dynamometer RoaDyn P650 als Prüfstands-Messglied

Die Anbindung an den Rollenprüfstand erfolgt in diesem Fall über eine sogenannte Achswippe, welche gleichzeitig als Nabenadapter für das Dynamometer fungiert. Der glockenförmige ausgeführte Felgenadapter ermöglicht über ein speziell ausgeführtes Lochbild die problemlose Adaption sämtlicher Basisräder mit den entsprechenden Design-Varianten. Damit ist es möglich, dass nicht nur Reifen sondern komplette Räder, d.h. Reifen plus Felge, unbeeinflusst durch das Messglied getestet werden können. Dieses Merkmal spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung neuer Räder für die Serienzulassung.

Die Untersuchung bzw. die Bestätigung der Dauerbetriebsfestigkeit von neu entwickelten Rädern erfolgt heutzutage überwiegend durch Nachfahrprogramme auf sogenannten zweiaxialen Räderprüfständen (ZWARP) bei denen das Rad in einer rotierenden Trommel läuft. Dabei ist das Ziel die Bedingungen des Straßeneinsatzes so gut wie möglich nachzubilden, obwohl die Krafteinleitung grundlegend anders erfolgt. Während auf der Strasse die Kräfte infolge einer Relativbewegung zwischen Reifen und Fahrbahn durch Kraftschluss übertragen werden, geschieht dies im ZWARP durch Formschluss unter Zuhilfenahme von seitlichen Anlaufingen. Um dennoch eine möglichst gute Übereinstimmung zu bekommen, muss der resultierende Kraftvektor bestehend aus der Radial- und Seitenkraft in beiden Fällen identisch in bezug auf Größe, Richtung sowie Angriffspunkt sein [Schwendemann/Eisenkolb]. Um dies sicherzustellen, bedarf es einer sogenannten Abrollprüfung auf dem universellen Reifenprüfstand.

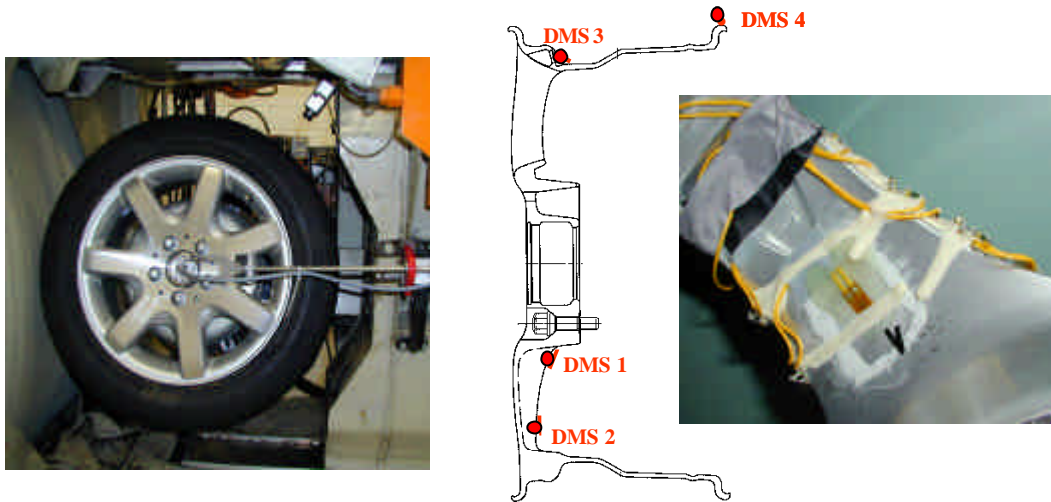


Bild 7: Rad-Abrollprüfung am Reifenprüfstand mit Kistler Radkraft-Dynamometer

Ausgehend von einem vorgegebenen Kundenkollektiv, d.h. für eine Rad-Reifen Dimension bei einer Radlast, wird auf dem Reifen- bzw. Rollenprüfstand eine Abrollprüfung durchgeführt, bei der gewisse Punkte des zugrundeliegenden Bemessungskollektivs angefahren werden. Die Einleitung der äußeren Radkräfte, die hierbei in gleicher Weise wie auf der Strasse im Reibschluss erfolgt, wird durchgängig mit dem Kistler Radkraft-Dynamometer erfasst. Die ausgewählten Punkte des angefahrenen Bemessungskollektivs dienen letztendlich als Eingangsgröße für eine Spannungsanalyse mittels Dehnungsmessstreifen, d.h. parallel zu der Messung der an der Nabe angreifenden Kräfte über das Dynamometer werden zusätzlich die Spannungen bzw. Dehnungen an 4 Orten auf der Felge gemessen (siehe Bild 7).

Im Nachfahrprogramm auf dem ZWARP Prüfstand wird das Nachfahrkollektiv mit dem Schadensinhalt des Bemessungskollektivs verglichen. Dabei wird das gleiche Rad eingesetzt, um die benötigten Kontrollparameter zur Justierung des ZWARP Prüfstandes mittels der Dehnungs-Messstreifen einzustellen. Bild 8 zeigt die auf dem ZWARP Prüfstand für ein bestimmtes Rad gemessenen Dehnungsamplituden in % im Vergleich zu den Messungen auf dem Rollenprüfstand.

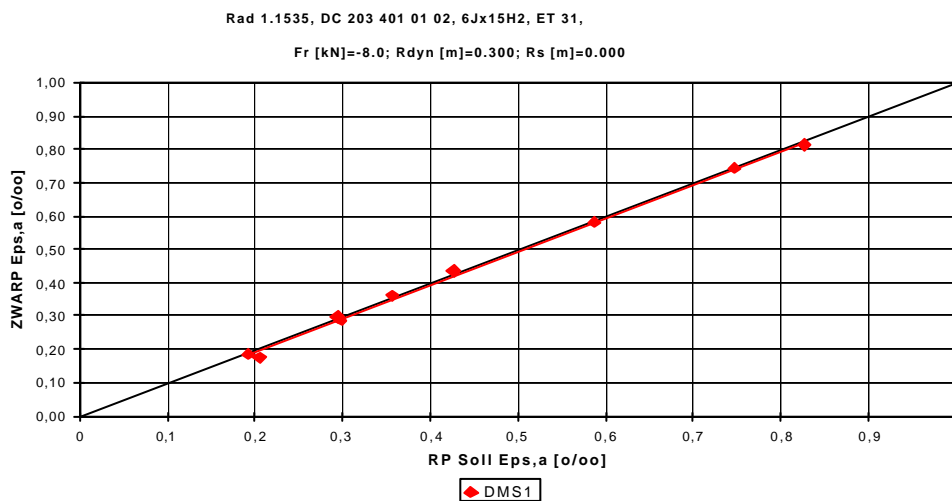


Bild 8: Vergleich zwischen Ziel und aktueller Messung auf dem ZWARP

5 Einsatz eines RoaDyn im Fahrversuch

Neben dem Einsatz auf ortsfesten Prüfständen [Said] stellt bei heutigen Entwicklungs- und Abstimmungsprozessen im Fahrwerkbereich die Verwendung von Mehrkomponenten-Messfelgen im Fahrversuch einen wichtigen Bestandteil dar. Der nachfolgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Beschreibung von möglichen Einsatzgebieten eines RoaDyn P650 aus der Sicht eines Anwenders. Dabei wird insbesondere auf Besonderheiten, die sich prinzipbedingt beim Einsatz eines Messrades in einem dynamischen System, wie z.B. im Komplex Fahrbahn/Fahrwerk/Fahrzeug abspielen eingegangen.

Wie bereits in diesem Artikel aufgezeigt können heutige Radkraft-Dynamometer bis in sehr hohe Frequenzbereiche (>1 kHz) ihre Messaufgaben lösen. Dynamische Grenzen werden vor allem durch die Lage der Eigenfrequenzen solcher Messsysteme definiert, die ihrerseits über Massen und Steifigkeiten anzugeben sind. Der Einsatz von piezoelektrische Kraftsensoren erlaubt in der Regel eine im Vergleich zu anderen Messprinzipien steifere Auslegung der eigentlichen Messstelle. Die genannten Vorzüge eines weiten Messbereichs der Systeme im Frequenzbereich werden insbesondere dann von Interesse, wenn Kräfte und Momente möglichst in der örtlichen Nähe der eigentlichen Sensoren gesucht sind. Diese Messaufgaben wurden bereits im vorangegangenen Abschnitt 4 ausführlich erläutert. Stichworte hierzu sind z.B. Belastungen an Krafteinleitungspunkte in Fahrzeugfelgen oder in die Fahrzeugnabe. Diese Messwerte können sehr genau durch den Einsatz von Messfelgen bestimmt werden.

Daneben interessieren in der Fahrdynamik die entscheidenden Messgrößen die an der Schnittstelle Fahrzeug/Fahrbahn auftreten. Im Reifenlatsch müssen in allen kritischen und weniger kritischen Fahrsituationen die Kräfte und Momente, die ein Fahrzeug auf der Straße halten sollen, übertragen werden. Dementsprechend stellt deren Bestimmung, gerade im Fahrversuch auf realen Fahrbahnen, eine wichtige und anspruchsvolle Messaufgabe dar.

Am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt (*fzd*) wird unter anderem an der Konzeptionierung, Auslegung und Abstimmung von Regelungen für aktive und semiaktive Fahrwerksysteme geforscht. Ein wichtiger Bestandteil der gestellten Forschungsaufgaben beschäftigt sich mit einer Optimierung von Fahrsicherheitsaspekten, wie z.B. eine Beeinflussung der dynamischen Radlast sowie der übertragbaren Brems- oder Seitenkräfte auf unebenen Fahrbahnen. Für leistungsfähige Regelungen, wie auch für die objektive Bewertung von darstellbaren Ergebnissen ist eine möglichst gute Kenntnis der im Reifenlatsch wirkenden dynamischen Größen wünschenswert.

Beim Einsatz einer Messfelge, die ihrerseits ein schwingungsfähiges System darstellt, im Fahrwerk/Fahrzeug müssen entscheidende Wechselwirkungen der Einzelkomponenten berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde bei *fzd* zu Beginn des geplanten Einsatzes des RoaDyn P650 eine spezielle Untersuchung durchgeführt. Deren Ziel war eine Definition von systembedingten Grenzen beim Einsatz des Messrades im Versuchsfahrzeug. D.h. die Bestimmung einer Übertragungsfunktion zwischen Messsignal und der tatsächlich im Reifenlatsch wirkenden Größen soll angestellt werden.

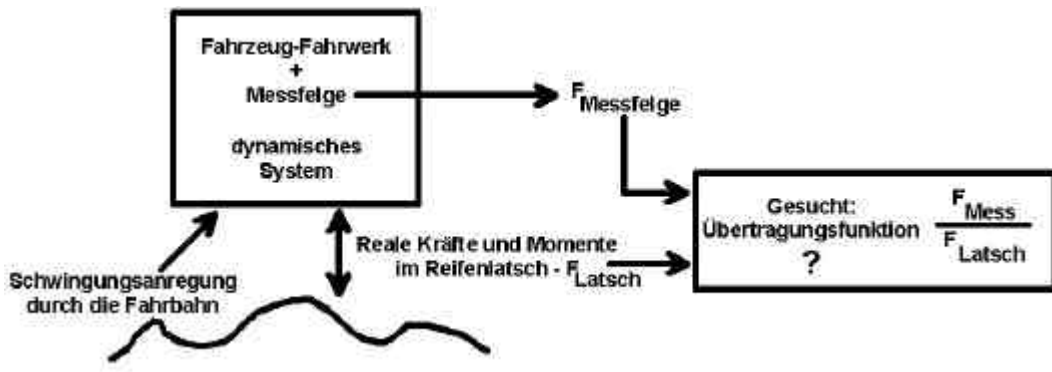


Bild 9: Übertragungsfunktion: Messfelge -> Reifenlatsch

Das nachfolgende Bild 10 verdeutlicht an Hand eines einfachen Modells die berücksichtigten Systemparameter.

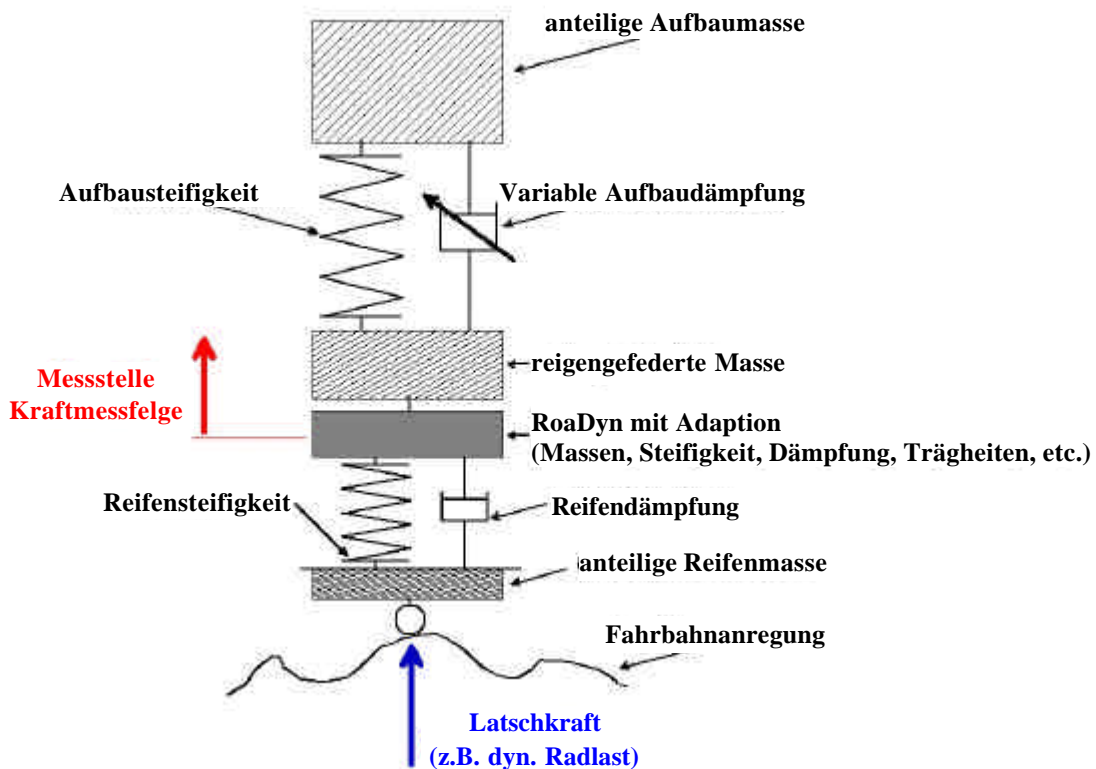


Bild 10: Modellparameter zur Abschätzung der Übertragungsfunktion Messfelgen-./ Latschkraft

Neben der bekannten Aufteilung (anteilige Aufbaumasse und reifengefederte Masse) sind diesem schwingungsfähigen System weitere Freiheitsgrade hinzugefügt. Im mittleren Teil von Bild 10 wird die Messfelge selbst als dynamisches System angegeben (Massen, Trägheiten, Dämpfungen und Steifigkeiten).

Ferner muss der Reifen als Mehrmassensystem verstanden werden. Zu guter Letzt sei auf die wichtigen Wechselwirkungen in Folge von variablen Parametern im Fahrwerk hingewiesen. Z.B. sind bei der Bestimmung der zu suchenden Übertragungsfunktion Änderungen der Steifigkeit oder der Dämpfung zwischen Fahrwerk und Fahrzeugaufbau ebenfalls zu berücksichtigen.

Durchgeführt wurden die Messungen auf einer hydraulischen 4-Stempel-Anlage. Neben der Aufzeichnung von fahrwerkrelevanten Messdaten war eine Erfassung der Stempelbewegungen wichtig, um eine möglichst exakte Bestimmung der in der Kontaktzone Reifen/Fahrbahn herrschenden Kräfte anstellen zu können. Bild 11 zeigt den Messaufbau für die Messung bei vertikaler Anregung durch den Hydraulikstempel.

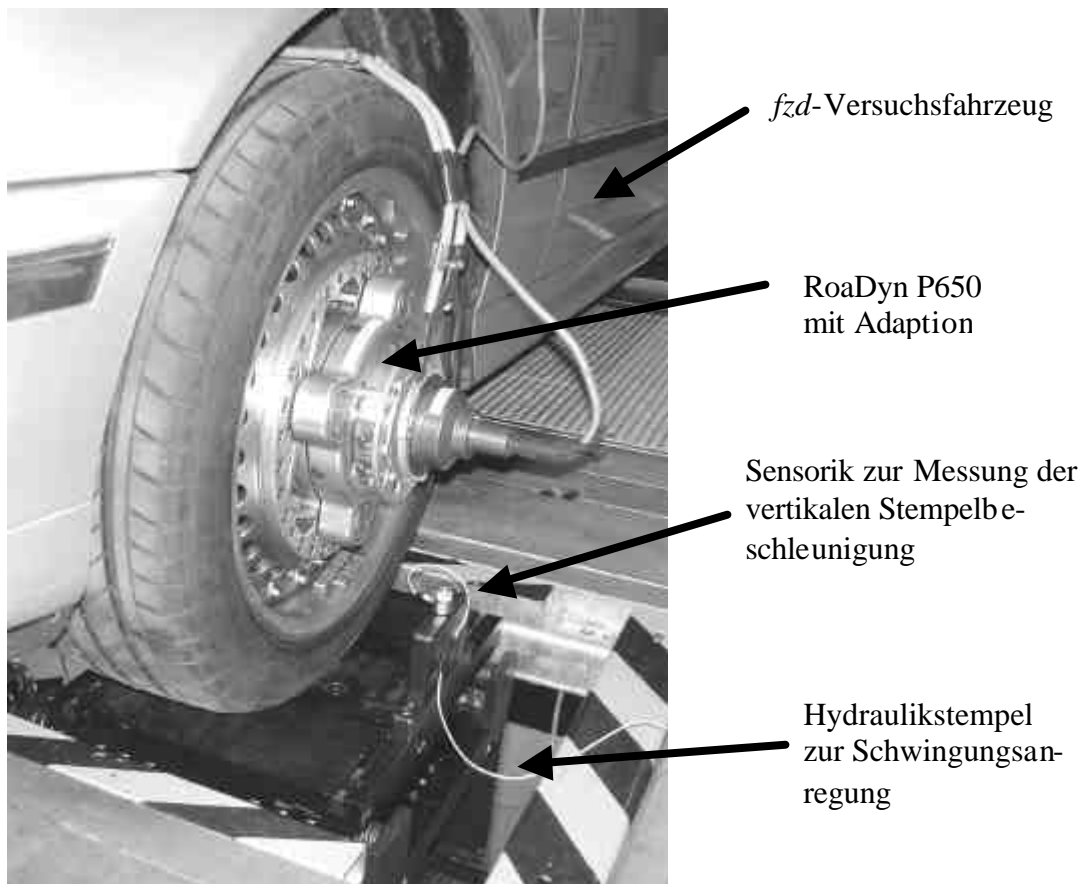


Bild 11: Messaufbau für vertikale Fahrwerkanregungen

Im Rahmen der Untersuchungen wurden auf dem Prüfstand unterschiedliche Anregungsprofile nachgefahren. Infolge von Nichtlinearitäten im Fahrwerk stellten neben unterschiedlichen Schlechtwegstreckenprofilen Messungen bei monofrequenter Anregung einen wichtigen Teil dar. Die dargestellten Messergebnisse (Bild 12 und Bild 14) zeigen die Amplitudenverläufe der Übertragungsfunktion im Frequenzbereich. Neben einer Variation der Anregungsprofile unterscheiden sich die beiden Diagramme hinsichtlich des Parameters Aufbaudämpfung.

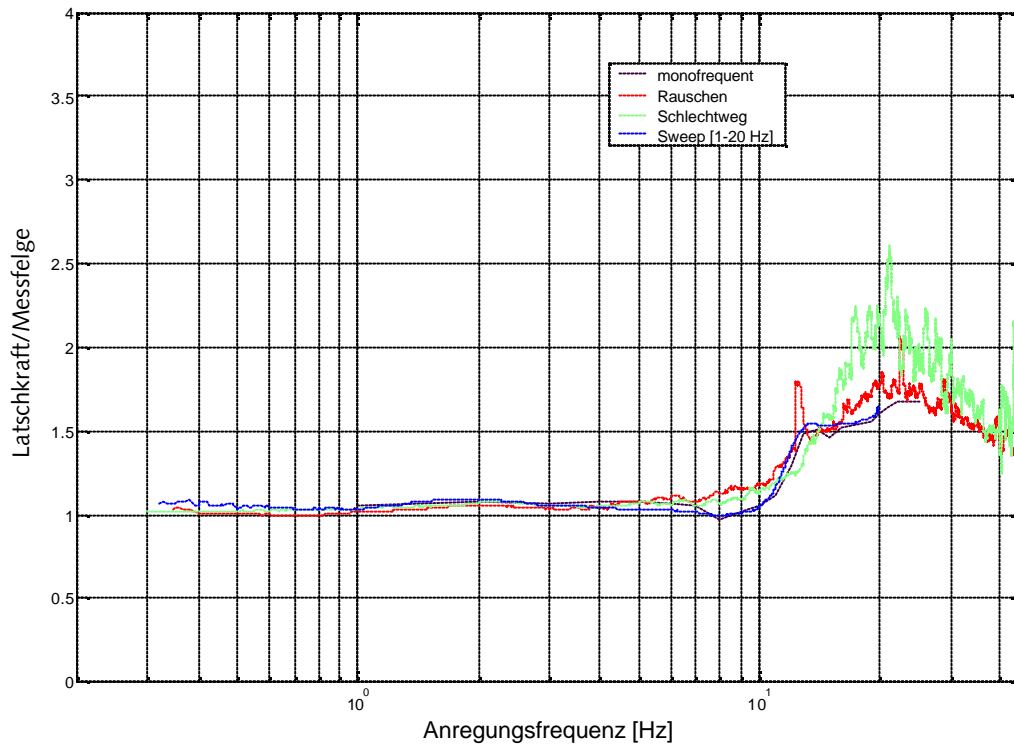


Bild 12: Amplitudenspektrum – Aufbaudämpfung hoch

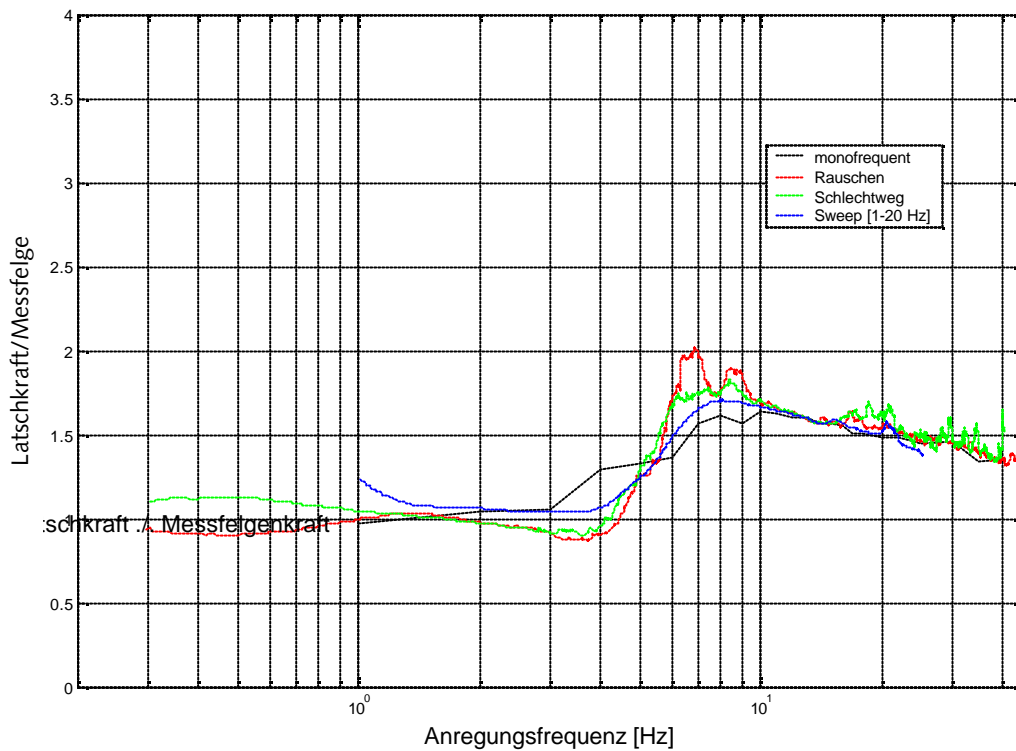


Bild 13: Amplitudenspektrum – Aufbaudämpfung niedrig

Es wird deutlich, dass nicht in allen vertikalen Anregungsfrequenzen davon ausgegangen werden kann, dass die gemessenen Kräfte in der Messfelge denen des Reifenlatsches entsprechen. Beim Einsatz von Radkraft-Dynamometern im Fahrversuch muss eine Kenntnis der vertikalen Anregungsfrequenzen vorliegen. Nur so lässt sich eine genauere Angabe über die Zustände im Latsch tätigen. Darüber hinaus sollte berücksichtigt werden, in welchem Fahrzeug (Masse, Steifigkeiten, Dämpfungen, Reifen, etc.) das Messsystem eingesetzt wird. Dies spiegelt sich z.B. in der Lage von Eigenfrequenzen wieder.

Ausgehend von den gezeigten Ergebnissen der Übertragungsfunktionen zeigen die abschließenden Diagramme die Ergebnisse der gemessenen dynamischen Radlast sowie der vertikalen Radträgerbeschleunigung bei einer hochfrequenten Fahrbahnanregung. Der Versuch stellt die Überfahrt einer Schlagleiste mit einer Höhe von 40 mm dar. Dieser Impuls führt zu einer hochdynamischen Anregung des Fahrwerks zu hochfrequenten Schwingungen mit weit über 400 Hz.

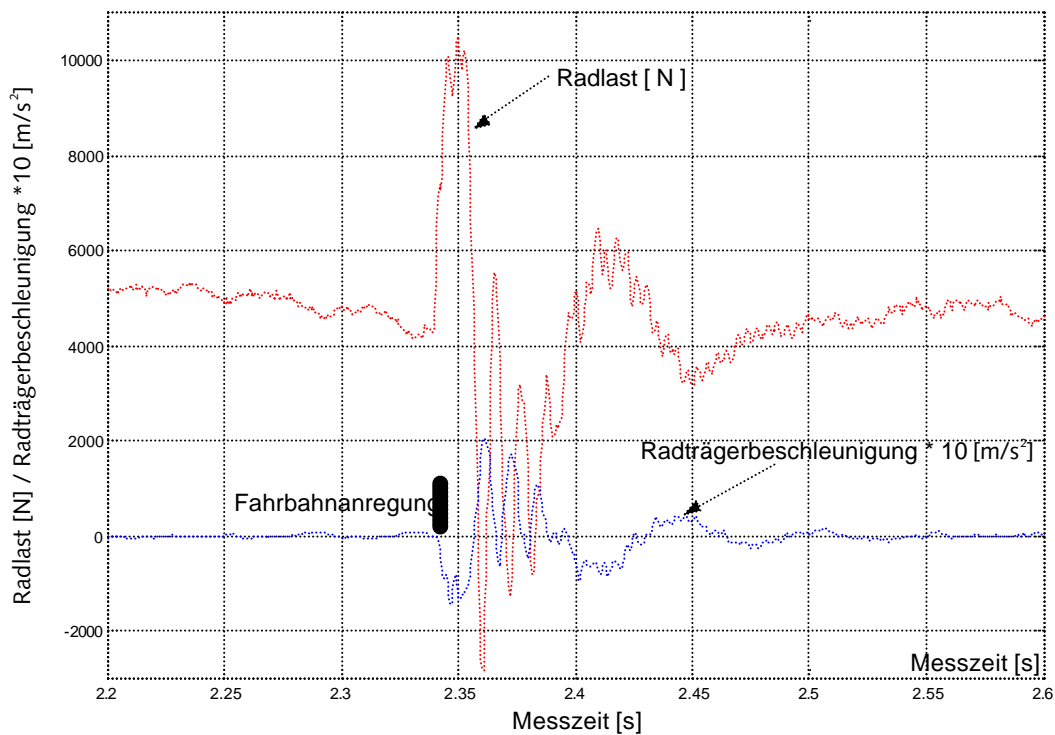


Bild 14: Messergebnis – hochfrequente Fahrbahnanregung

Dies ferner mit hohen Radträgerbeschleunigungen (bis 20 g). Das dynamische System Reifen-Felgenadaption-Messfelge-Aufbaufeder-Dämpfung (siehe auch Bild 9 und Bild 10) reagiert hierauf mit Vertikalschwingungen in vielen Freiheitsgraden, was eine Erklärung für die messbaren *negativen* Radlasten (bei ca. 2,355 s in Bild 14) sein könnte. Möglicher Weise schwingen in diesen Momenten der Radträger und der Reifen gegenphasig wodurch das Radkraft-Dynamometer seitens des Reifens eine Zugkraft in Richtung Fahrbahn erfährt [Gillespie]. An Hand solcher extremen Fahrzustände können Grenzen bei der Aufgabe der Messung von Latschgrößen durch eine Messfelge aufgezeigt werden.

An Hand von Bild 15 wird deutlich, dass obige Probleme nicht auftreten wenn die Anregungsfrequenzen in geringeren und damit in fahrdynamisch relevanteren Bereichen liegen.

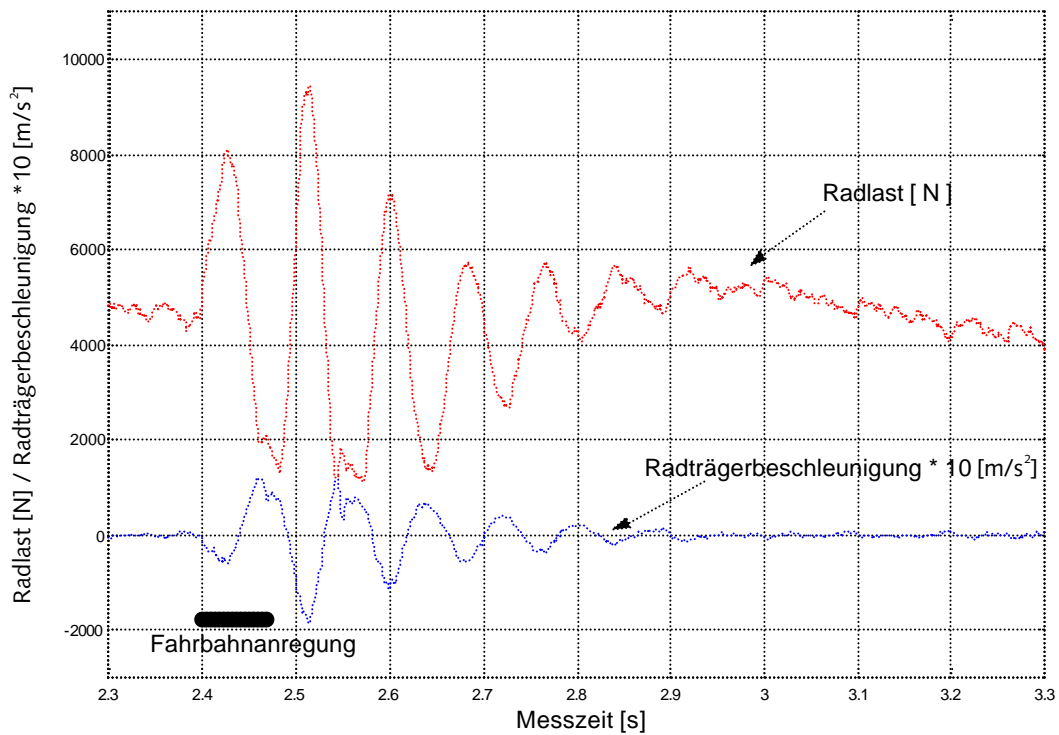


Bild 15: Messergebnis – niederfrequente Fahrbahnanregung

Für die gezeigten Messverläufe wurde das Fahrwerk erneut einmalig durch die Fahrbahn angeregt (bei ca. 2,4 s in Bild 15). Das System schwingt anschließend mit ca. 11 Hz. Durch das Fehlen der hochfrequenten Anteile treten keine Messprobleme auf. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die oben beschriebene gegenphasige Schwingungsform (Radträger zu Reifen) nicht einstellen kann.

6 Literatur

- [Gautschi] Gautschi, G.: Piezoelectric Sensorics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002
- [Gillespie] Gillespie, T.: Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE-Inc., ISBN-Nr. 1-56091-199-9, Warrendale, 1992, USA
- [Said] Said, M.: Prüfstand zur Messung der dynamischen Radlast von Kraftfahrzeugen, IVK, Stuttgart, 1991.
- [Schwendemann/Eisenkolb] Schwendemann, H.; Eisenkolb, R.: ZWARP User-Treff, Sept. 2001, Darmstadt, Germany

Kistler weltweit

Europa

Deutschland

Kistler Instrumente GmbH
Postfach 1262
DE-73748 Ostfildern
Tel. (+49) 7 11 34 07 0
Fax (+49) 7 11 34 07 159
info.de@kistler.com

Frankreich

Kistler SA
ZA de Courtabœuf 1
15, avenue du Hoggar
FR-91953 Les Ulis cédex
Tel. (+33) 1 69 18 81 81
Fax (+33) 1 69 18 81 89
info.fr@kistler.com

Italien

Kistler Italia s.r.l.
Via Paolo Uccello, 4
IT-20148 Milano
Tel. (+39) 2 481 27 51
Fax (+39) 2 481 28 21
sales.it@kistler.com

Österreich

K-Vertrieb GmbH
Technisches Büro Wien
Lemböckgasse 49f
AT-1230 Wien
Tel. (+43) 1 867 48 67 0
Fax (+43) 1 867 48 67 17
sales.at@kistler.com

Grossbritannien

Kistler Instruments Ltd.
Alresford House, Mill Lane
Alton, Hampshire GU34 2QJ, UK
Tel. (+44) 1420 54 44 77
Fax (+44) 1420 54 44 74
sales.uk@kistler.com

Schweiz/Liechtenstein

Kistler Instrumente AG
Verkauf Schweiz
Postfach, Eulachstr. 22
CH-8408 Winterthur
Tel. (+41) 52 224 12 32
Fax (+41) 52 224 14 21
sales@kistler.ch

Asien

Volksrepublik China

Kistler China Ltd.
Unit D, 24 / F Seabright Plaza
9 – 23 Shell Street
North Point, Hong Kong
Tel. (+852) 25 91 59 30
Fax (+852) 25 91 18 85
sales@kistler.com.cn

Representative Office Beijing

Tel. (+86) 10 8225 2163
Fax (+86) 10 8225 2124
sales@kistler.com.cn

Republik Korea

Kistler Korea Co., Ltd.
3rd Floor, Bow Building
1580-1, Seocho-3 dong,
Seocho-ku,
Seoul, Korea 137-875
Tel. (+82) 2 597 6013
Fax (+82) 2 525 6015
sales.kr@kistler.com

Japan

Kistler Japan Co., Ltd.
MT Building
7-5, Shibadaimon 2-chome
Minato-ku, Tokyo 105
Tel. (+81) 3 35 78 02 71
Fax (+81) 3 35 78 02 78
sales.jp@kistler.com

Singapur

Kistler Instruments (Pte) Ltd.
22A Sixth Avenue
Singapore 276 480
Tel. (+65) 6469 6773
Fax (+65) 6469 5684
sales.sg@kistler.com

Amerika

USA / Kanada

Kistler Instrument Corp.
75 John Glenn Drive
Amherst, NY 14228-2171
Tel. (+1) 716 691 5100
Fax (+1) 716 691 5226
sales.us@kistler.com

Andere Länder

Kistler Instrumente AG
Export Sales
Postfach, Eulachstr. 22
CH-8408 Winterthur
Tel. (+41) 52 224 11 11
Fax (+41) 52 224 15 49
sales.export@kistler.com

Hauptsitz

Schweiz

Kistler Instrumente AG
Postfach, CH-8408 Winterthur
Tel. (+41) 52 224 11 11
Fax (+41) 52 224 14 14
info@kistler.com

www.kistler.com

KISTLER
measure. analyze. innovate.