

## Entwicklung einer schwingungsunempfindlichen Vorderachskinematik

Bremsenrubbeln und Radunwuchtschwingungen sind fremderregte Schwingungen, die der Fahrer als Diskomfort wahrnehmen kann. Um diese Störungen möglichst abstellen zu können, ist zunächst die Analyse des Übertragungsverhaltens eines Fahrwerks notwendig. Zusammen mit der Audi AG hat die Technische Universität München diesbezüglich Untersuchungen anhand eines Mehrkörper-Gesamtfahrzeugmodells durchgeführt. Die Resultate sind die Basis für ein Achsmodell, mit dessen Hilfe sich eine Kinematikoptimierung erreichen lässt.

## 1 Einleitung

Durch die gestiegenen jährlichen Fahrleistungen, die höhere Verkehrsdichte und den bereits erreichten hohen Standard auf dem Gebiet der Fahrwerkstechnik rückt der Fahrkomfort verstärkt in den Fokus der Kaufentscheidung des Kunden. Nachteilig auf diesen wirkt sich jegliche Art von Schwingung aus, da sie als Geräusch oder Vibration vom Kunden wahrgenommen werden kann.

Beim Bremsenrubbeln handelt es sich um bremsinduzierte Schwingungen, die im Kontaktbereich von Bremsbelag und -scheibe erzeugt und anschließend von den Elementen der Radaufhängung auf Karosserie und Lenkanlage übertragen werden. Der Fahrer kann diese Störungen zum Beispiel als Dröhnen, Pedalpulsation, Lenkrad- und Karosserieschwingungen wahrnehmen. Radunwuchten führen durch die außerhalb der Raddrehachse liegende Hauptträgheitsachse des Rades zu Radkraft- und Radmomentenschwankungen und erzeugen somit Achsschwingungen, die wiederum über die Elemente der Radaufhängung auf das Lenkungssystem und die Karosserie weitergeleitet werden. Die Automobilindustrie bearbeitet diese Problemstellungen im Moment mit zeit- und kostenintensiven empirischen Maßnahmen, da grundlegende Konstruktionsrichtlinien für die schwingungsoptimale Gestaltung von Achssystemen fehlen.

Bremsrubbeln lässt sich in Kalt- und Heißrubbeln unterteilen [1]. Da es schwierig ist, reproduzierbare Versuchsbedingungen für Heißrubbeln zu gewährleisten, beschränkt sich die folgende Betrachtung auf Kaltrubbeln. Ziel dieser Untersuchung ist es, eine Schwingungsanalyse aufzuzeigen, mit der ganzheitlich fremderregte Schwingungen untersucht werden können. Zudem wird aufbauend auf einem validierten Mehrkörpersimulationsmodell (MKS-Modell) eine Optimierung der Achskinetik bezüglich der Schwingungsempfindlichkeit durchgeführt.

## 2 Signalanalyse und Schwingungsbewertung

Um die Phänomene ganzheitlich zu betrachten, wird eine Darstellungsform benötigt, die Erregung (Brake Torque Variation (BTV), Unwuchtkraft), Übertragung

und Ausgangssignale des Schwingungssystems darstellt. Da es sich beim Kaltrubbeln und bei Unwuchtschwingungen um Erregungen in der ersten oder einer vielfachen Ordnung der Raddrehfrequenz handelt, bietet sich hier die Ordnungsanalyse als Werkzeug an.

Die Erregung wird mit Sechs-Komponenten-Kraftmessfeldern an den Vorderrädern gemessen. Beschleunigungssignale der Kinematikpunkte dokumentieren das Verhalten der Übertragungsstrecke und als Ausgangssignale werden Beschleunigungen an Sitzschiene und Lenkradkranz betrachtet. Bei der Ordnungsanalyse werden die Signale mithilfe der FFT in ihre Frequenz- und Phasenteile zerlegt und das Frequenzspektrum bezüglich der Raddrehfrequenz normiert.

In **Bild 1** links ist beispielhaft die Ordnungsanalyse der Sitzschienebeschleunigung dargestellt. Hier sind über der Raddrehfrequenz (y-Achse) die Amplitude (z-Achse/Farbskala) und die Ordnung (x-Achse) des Schwingungssignals gezeigt. Alle Messgrößen werden für die Auswertung auf Dezibel normiert. Für die Wiedergabe des zeitlichen Verlaufs während einer Bremsung wird die Raddrehfrequenz negiert und dadurch können die Diagramme von links nach rechts, Bild 1 rechts, gelesen werden. Für eine vergleichende Darstellung werden Schnitte konstanter Ordnung, dargestellt durch die vertikalen Schnitte in Bild 1 links, aus der Ordnungsanalyse extrahiert und die sieben Schnitte mit den größten Werten aufgetragen.

Die einhüllende Kurve dieser Schnitte wird in einem Übersichtsblatt, grüne Linie in **Bild 2**, mit weiteren Hüllkurven (OrdHk) anderer Signale dargestellt. Auf diese Weise lassen sich in einem Plot die Anregung (BTV links und rechts: MyMrvl und MyMrvr; Längkraftschwankung links und rechts: FxMrvl, FyMrvr), die Übertragungsstrecke (Vorderachsbeschleunigungen gleich- und gegenphasig: axVaiP, axVagP) und die Ausgangssignale (Sitzschiene- und Lenkradbeschleunigung: axSSvl, ayLD) zusammenfassen. Im zweiten kleinen Diagramm von Bild 2 ist der Geschwindigkeitsverlauf der Bremsung und die Phasenlage der Momentenschwankungen vorne links und rechts dargestellt. Damit lassen sich gleich- und gegenphasige Bremsungen unterscheiden.

## Die Autoren



**Dipl.-Ing. Albert Schlecht** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München in Garching.



**Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing** ist Leiter des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München in Garching.



**Dipl.-Ing. Helmut Krome** ist verantwortlich für die Entwicklung der Kinematik von Vorder- und Hinterachse bei der Audi AG in Ingolstadt.



**Dipl.-Ing. Günter Hackenberg** ist verantwortlich für Analysen der Fahrzeugphysik im Bereich Entwicklung Gesamtfahrzeug der Audi AG in Ingolstadt.

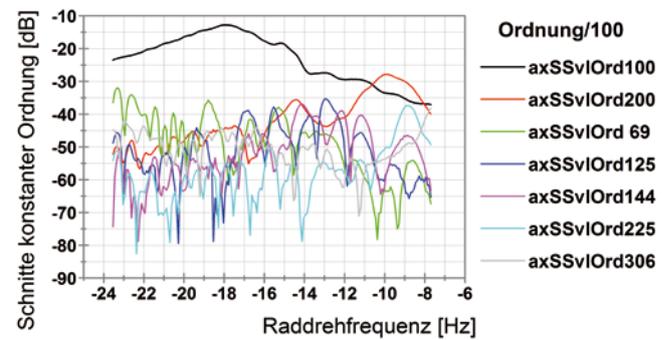
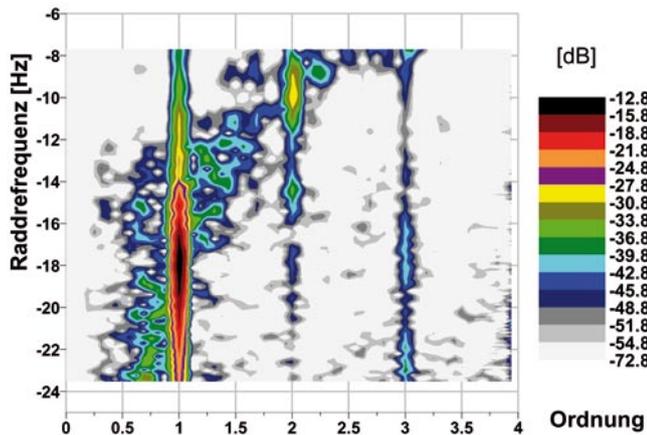


Bild 1: Ordnungsanalyse der Sitzschienenbeschleunigung (links) und daraus Schnitte konstanter Ordnung (rechts)

### 3 Aufbau und Validierung des Simulationsmodells

Die Validierung der Bremsrubbelsimulation erfolgt mit der vorher beschriebenen Signalanalyse. Die Kaltrubbelversuche werden mit präparierten Bremscheiben durchgeführt. Aus der Vielzahl an Messungen geht eine Amplitude von 50 Nm BTV als eine sehr hohe Anregung hervor. Für die Simulation wird folglich diese Amplitude als Anregung verwendet. Bild 3 zeigt den Vergleich der Hüllkurven der Ordnungsanalysen aus Simulation und Fahrversuch bei einer gleichphasigen Rubbelbremsung. Für das bei gleichphasigen Bremsungen betrachtete Signal Sitzschienenbeschleunigung (axSSvI\_OrdHk) unterscheiden sich die Hüllkurven in Simulation und Versuch sowohl bezüglich ihrer Amplitude als auch ihrer Frequenzlage nur geringfügig. Die Validierungen der Lenkraddrehbeschleunigungen (ayLD\_OrdHk) aus gegenphasiger Bremsrubbelsimulation zeigen vergleichbar gute Ergebnisse.

Das MKS-Modell ist in der Simulationsumgebung Adams-Car aufgebaut. Es besteht aus Vorder- und Hinterachse, Antriebsstrang, Lenkungssystem – in diesem Fall eine hydraulisch unterstützte Zahnstangenlenkung – Karosserie und Rädern. Alle Bauteile sind als Starrkörper modelliert. Das F-Tire-Reifenmodell [3] wird für die Abbildung der Reifeneigenschaften verwendet. In Bild 4 sind die beiden verwendeten Modelle abgebildet. Für Unwucht- und Kaltrubbelversuchen wird das Gesamtfahrzeugmodell verwendet, für die Analyse der Elastiki-

nematik wird die Vorderachse auf einem virtuellen Achsprüfstand untersucht.

Wie in [1] beschrieben wird für die Kaltrubbelversuche das Fahrzeug aus einer Anfangsgeschwindigkeit von 180 km/h konstant verzögert und mit überla-

gerten Bremsmomentenschwankungen angeregt. Diese Sinusschwingungen werden sowohl gleich- (Anregung Sitzschiene) als auch gegenphasig (Anregung Lenkungssystem) in getrennten Rechnungen aufgebracht. Unwuchterregte Kräfte wer-

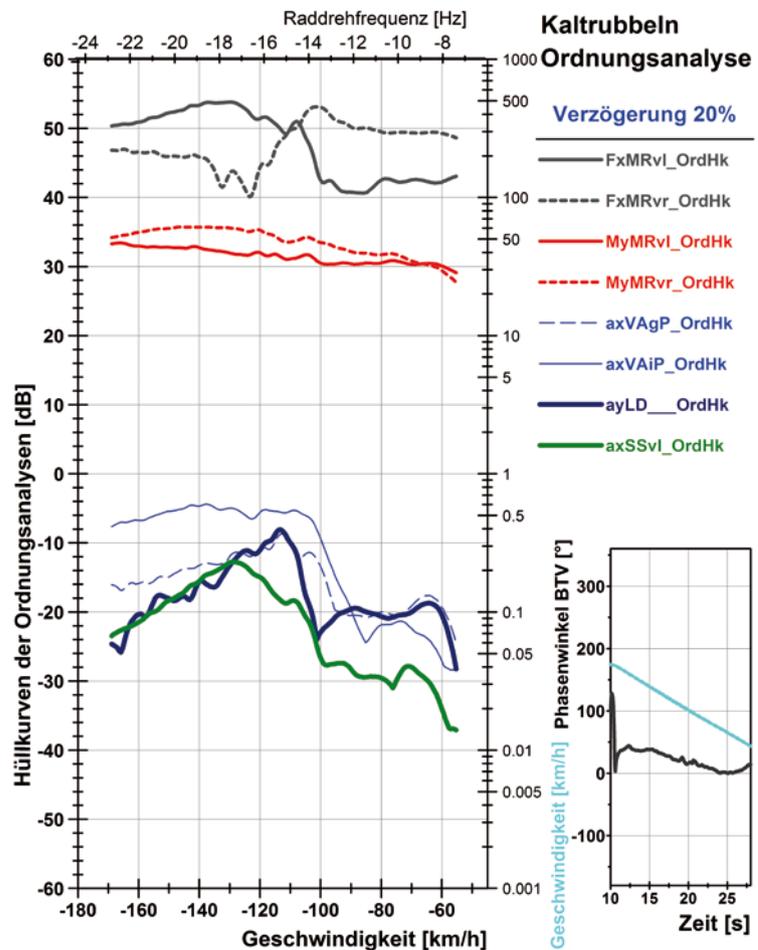


Bild 2: Hüllkurven der Ordnungsanalysen für eine Kaltrubbelversuchsbremung

den in der Simulation über Kraftvektoren an der Radachse eingebracht und sowohl gleich- als auch gegenphasig untersucht.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Mehrkörpersimulation für die beiden Manöver Bremsenrubbeln und Radunwucherregung auf sehr hohem Niveau die Fahrversuche widerspiegelt und damit für eine Optimierung der Fahrwerkparameter geeignet ist.

#### 4 Optimierungsumgebung

Für die Optimierung der Vorderachskinematik wird die Mehrkörpersimulation in eine Optimierungsumgebung eingebunden. Von einem bestehenden Ausgangssystem aus startend kann mit Hilfe unterschiedlicher Optimierungsalgorithmen [4] über die Kombination von Eingangs- und Ausgangsgröße ein optimales System gefunden werden. Den prinzipiellen Aufbau der Optimierungsumgebung zeigt Bild 4.

Als Zielwert für die Optimierung dient die Minimierung der maximalen Beschleunigungen an Sitzschiene und Lenkrad (Gesamtfahrzeugsimulation). Kinematische Grenzwerte bilden Randbedingungen, wie zum Beispiel Spur- und Sturzwinkeländerung über dem Federweg und Ackermannnäherung, ab, die am virtuellen Achsprüfstand ermittelt werden. In Summe werden über 140 Randbedingungen berücksichtigt. Die Eingangsgrößen für die Optimierung der Vorderachskinematik sind die rad- und karosserie-seitigen Kinematikpunkte – symmetrisch links und rechts. Der Optimierungsraum wird durch definierte Bereiche beschränkt. Diese geometrischen Randbedingungen sind durch die transparenten Kästchen des Achskonzepts in Bild 5 dargestellt.

#### 5 Potenzial der Optimierung

Ein mögliches konstruktiv umsetzbares Achskonzept zeigt Bild 5. Die roten Linien geben die Lage der Lenker der Ausgangsachse wieder. Die blauen Linien stellen die Lenker der optimierten Achse dar. Die gestrichelten vertikalen Linien zeigen die Lage der virtuellen Lenkachse.

Bezüglich der Schwingungsempfindlichkeit reduziert sich die Lenkraddrehbe-

# Softing

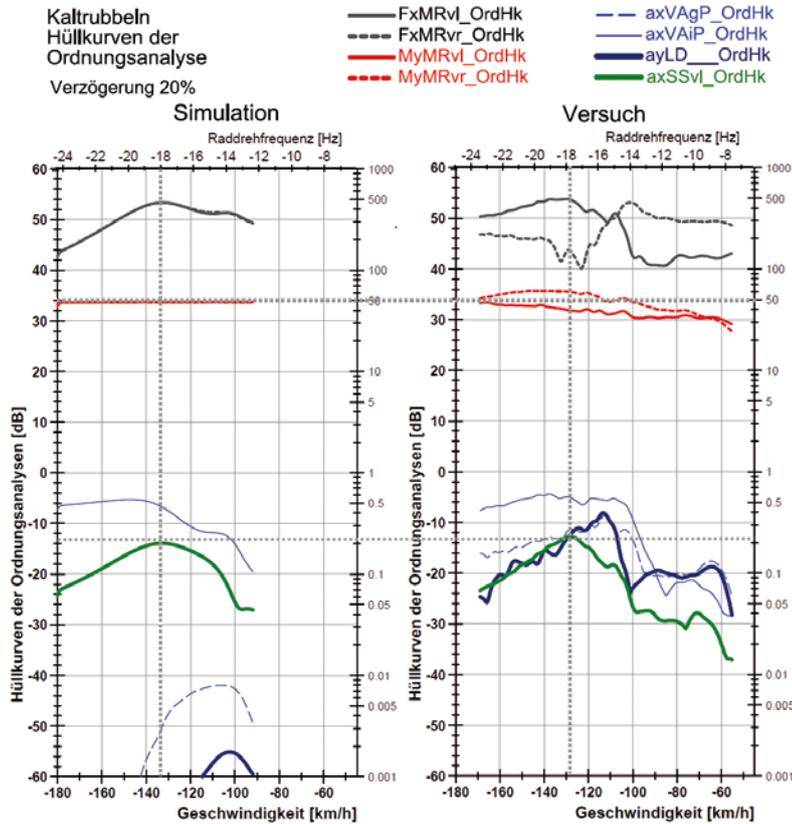
Ihr Partner für Diagnose, Kommunikation und Testen.



Die Softing AG mit Hauptsitz in Haar bei München steht als Systempartner seit fast 30 Jahren Fahrzeugherstellern, System- und Steuergeräteelieferanten mit leistungsfähigen Tools und Lösungen zur Seite. Von Softing-Produkten über kundenspezifische Lösungen bis hin zu Resident-Engineers und Consultants! Profitieren Sie von unserer Kompetenz!

[www.softing.com](http://www.softing.com)

**softing**  
your connection to excellence



**Bild 3:** Vergleich der Hüllkurven der Ordnungsanalyse aus Simulation und Fahrversuch für eine gleichphasige Anregung mit Bremsmomentenschwankungen

schleunigung um etwa 24 dB, **Bild 6**. Die Sitzschienenbeschleunigung nimmt um zirka 2 dB ab. Die Verbesserung an der Sitzschiene und die Verschiebung der Beschleunigungsmaxima zu höheren Frequenzen hin beruht dabei vor allem auf der Erhöhung der Längsteifigkeit durch die Änderung der Kinematikpunkte.

Das Manöver Radunwuchtanregung ist nicht in den Optimierungsprozess eingebunden. Aber auch hier stellt sich eine Verbesserung der Lenkraddrehbeschleunigung um zirka 8 dB ein.

Aus diesen Ergebnissen ist das hohe Potenzial der Kinematikoptimierung bezüglich Lenkraddrehbeschleunigungen ersichtlich. Für das Manöver Bremsenrubbeln müssen Steifigkeit und Dämpfung der Fahrwerkselementerlager im Bremsbetriebspunkt (Vorlast im Lager) möglichst hoch gewählt werden [1, 2]. Durch das geringe kinematische Verbesserungspotenzial für die Sitzschienenbeschleunigung muss weiterhin versucht werden, die Anregung durch die Bremsen zu reduzieren.

Die Verbesserung der Lenkraddrehbeschleunigung beruht auf verschiedenen Effekten, die dieses Ergebnis in ihrem Zusammenspiel ermöglichen. Dazu zählen die Reduzierung des Störkrafthebelarms,

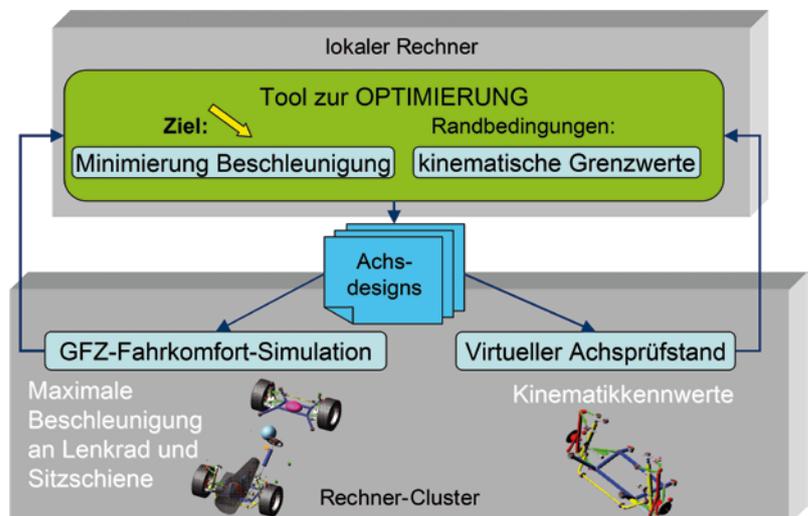
die Entkopplung der Frequenzlagen der Achsigenmoden und die Veränderung der Achsigenformen.

Zur Überprüfung der fahrdynamischen Eigenschaften der optimierten Kinematik werden diverse Fahrmanöver, darunter sind etwa die stationäre Kreisfahrt und das Sinuslenken, in der MKS-Gesamtfahrzeugsimulation untersucht und mit der Ausgangskinematik verglichen. Dabei treten keine wesentlichen Unterschiede hervor.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Audi und die TU München stellen einen Untersuchungsansatz für fremderregte Fahrwerksschwingungen, hervorgerufen durch Bremsenrubbeln oder Radunwuchten, vor. Die Analyse der Schwingungen im Frequenzbereich durch die Anwendung der Ordnungsanalyse lässt eine strukturierte Auswertung der Schwingungsphänomene zu. Eine erfolgreiche Validierung der Mehrkörpersimulation mit Ergebnissen aus Fahrversuchen erweckt hohes Vertrauen in die Simulationsergebnisse.

Auf dieser Basis wird das MKS-Modell in eine Optimierungsumgebung integriert, mit der das kinematische Potenzial einer Vorderachse für die Reduzierung der Schwingungsempfindlichkeit untersucht werden kann. Eine Berücksichtigung der fahrdynamischen Kennwerte einer Achse ist dabei zwingend notwendig. Die deutliche Reduzierung der Lenkraddrehbe-

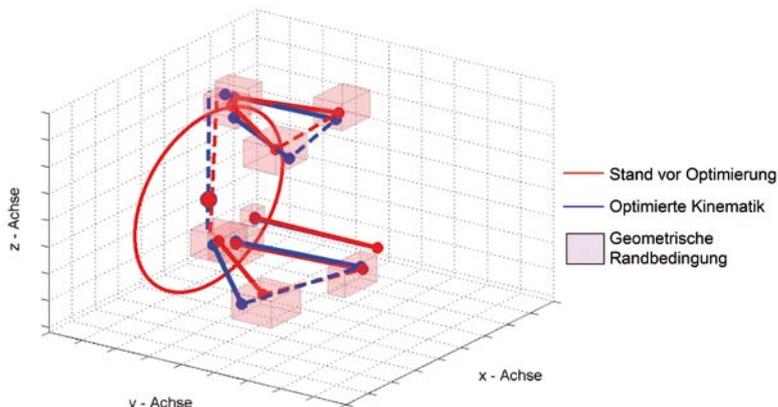


**Bild 4:** Struktur der Optimierungsumgebung

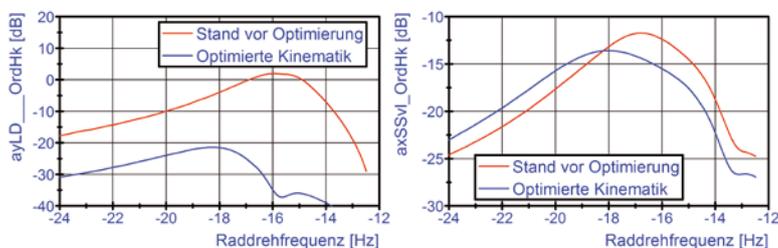
schleunigung kann durch eine optimierte Kinematik erreicht werden. Diese Kinematik ist bereits in eine reale Achse umgesetzt worden und in einem Fahrzeug integriert. So ist es demnächst möglich, die Validierung der Simulation für die optimierte Kinematik durchzuführen.

### Literaturhinweise

- [1] Bittner, C.: Reduzierung des Bremsenrubbels bei Kraftfahrzeugen durch Optimierung der Fahrwerkslagerung. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2006
- [2] Sedlan, K.: Simulation unwuchterregter und bremsinduzierter Lenkunruhe bei Pkw mit Feder-einachse. Vortrag, Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006
- [3] Gipser M.: Reifenmodelle in der Fahrzeugdynamik: Eine einfache Formel genügt nicht mehr, auch wenn sie magisch ist. Tagungsband, MKS-Simulation in der Automobilindustrie, Graz, 2001
- [4] Schittkowski K.: NLPQL: A Fortran Subroutine Solving Constrained Nonlinear Programming Problems. Annals of Operations Research, Vol. 5 (1985/86), S. 485-500
- [5] Schlecht, A.; Heißing, B.; Krome, H.: Entwicklung einer schwingungsunempfindlichen Vorderachskinematik mit Hilfe von Optimierungsmethoden. Vortrag, 12. Internationale VDI-Tagung Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, Hannover, 20./21. Oktober 2009



**Bild 5:** Vergleich der Kinematikpunkte vor und nach der Kinematikoptimierung – Blick in Fahrtrichtung von hinten auf das linke Vorderrad



**Bild 6:** Vergleich der Hüllkurven beim Bremsenrubbeln von Lenkraddreh- und Sitzschienenbeschleunigung vor und nach der Kinematikoptimierung

## Anleitung für den erfolgreichen Umgang mit chinesischen Geschäftspartnern



WWW.GABLER.DE



Gerhard Preyer / Reuß-Markus Krauß

### In China erfolgreich sein

Kulturunterschiede erkennen und überbrücken.

Strategien und Tipps für den Umgang mit chinesischen Geschäftspartnern

2009. 154 S. Br. EUR 29,90 ISBN 978-3-8349-1713-3

Wer auf dem chinesischen Markt erfolgreich sein möchte, braucht ein gewisses Verständnis der chinesischen Kultur und Gesellschaft und ihrer Kommunikationsformen. Geschäftsanbahnung, Standortwahl, Geschäftsabschluss und das fortlaufende erfolgreiche Entscheiden sind von diesem Verständnis abhängig. Dieser praktische Leitfaden hilft dem Leser, westlich-chinesische Kulturunterschiede zu erkennen, in ihrem Ausmaß zu gewichten, sie zu überbrücken und erfolgreich zu gestalten. Fundiert, kompakt, praxiserprobt.

Einfach bestellen:

kerstin.kuchta@gwv-fachverlage.de Telefon +49(0)611. 7878-626

KOMPETENZ IN SACHEN WIRTSCHAFT



Änderungen vorbehalten. Erhältlich im Buchhandel oder beim Verlag.