

## Minimierung von Kinetose beim autonomen Fahren

Experten gehen davon aus, dass autonomes Fahren die Schlüsseltechnologie für unser zukünftiges Verkehrssystem ist. Ein großer Vorteil dieser Technologie ist, dass die Insassen während der Fahrt andere Tätigkeiten ausüben können. Studien haben jedoch gezeigt, dass das Auftreten von Kinetose (Bewegungs-krankheit) beim autonomen Fahren deutlich höher ist als bei herkömmlichen Fahrzeugen. An der TU Darmstadt wurde eine aktive Luftfeder entwickelt, mit deren Hilfe der Fahrkomfort und die Fahrsicherheit verbessert wird.

### AUTOREN



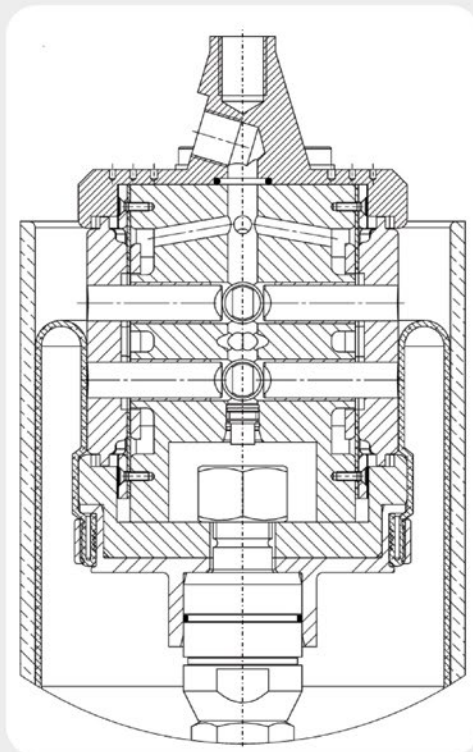
**Philipp Hedrich, M. Sc.**  
ist wissenschaftlicher  
Mitarbeiter am Institut für  
Fluidsystemtechnik der  
Technischen Universität  
Darmstadt.



**Dr.-Ing. Erik Lenz**  
ist wissenschaftlicher  
Mitarbeiter am Fachgebiet  
Regelungstechnik  
und Mechatronik der  
Technischen Universität  
Darmstadt.



**Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Peter Frank Pelz**  
ist Leiter des Instituts für  
Fluidsystemtechnik der  
Technischen Universität  
Darmstadt.



© Technische Universität Darmstadt

## 1 MOTIVATION

### 2 AKTIVE LUFTFEDER

### 3 MODELLBASIERTER FAHRWERKSREGLERENTWURF

### 4 AKTORVALIDIERUNG IN HARDWARE-IN-THE-LOOP-EXPERIMENTEN

### 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

## 1 MOTIVATION

Selbstfahrende Fahrzeuge sind entweder preiswerte Zweckfahrzeuge mit geringem Fahrkomfort oder Fahrzeuge, die als rollende Büros oder fahrende Wohnzimmer dienen und hohen Komfortansprüchen genügen müssen. Um diese Anforderung zu erfüllen, bieten sich geregelte aktive Feder-Dämpfer-Systeme zur Entkopplung des Chassis von der Straßenanregung an. Seit 2008 wird an der TU Darmstadt im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 805 „Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus“ eine aktive Luftfeder entwickelt. Das teiltragende aktive System verbindet die Vorteile einer Luftfederung mit denen eines aktiven Systems.

## 2 AKTIVE LUFTFEDER

Semiaktive Luftfedern mit zuschaltbaren Zusatzvolumina sind Stand der Technik, entkoppeln aber in Gegensatz zu aktiven Systemen den Aufbau nicht von der Anregung. Die benötigte Stellfrequenz zur aktiven Beeinflussung der Bewegung des Aufbaus ist 5 Hz. Die resultierende Druckkraft der Luftfeder ist (Erläuterung der verwendeten Formelzeichen siehe **TABELLE 1**):

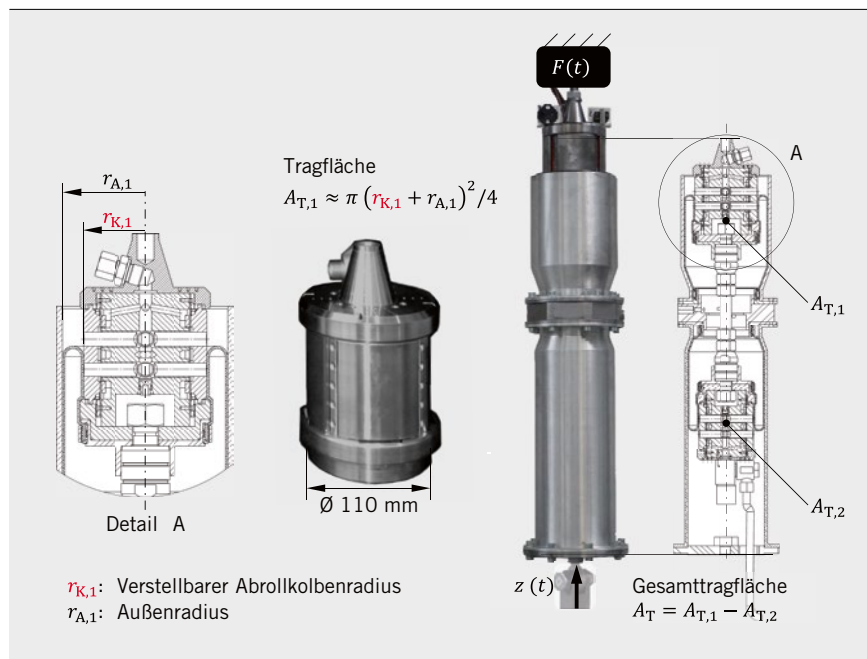
$$\text{Gl. 1} \quad F = (p - p_u) A_T$$

Um die Luftfeder aktiv auszuführen, gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder eine einfederungsunabhängige Anpassung des Luftfederdrucks oder eine Verstellung der Tragfläche. Eine Designbewertung zeigt, dass eine geregelte Anpassung des Drucks, zum Beispiel über eine Vergrößerung oder Verkleinerung des Luftfederolumens, zu langsam ist und eine Verstellung der Tragfläche besser zur Anpassung der Axialkraft geeignet ist. An der Technischen Universität Darmstadt wurde deshalb ein aktiver Abrollkolben entwickelt, dessen Radius  $r_K$  mit vier über die Mantelfläche verteilten Segmenten hydraulisch verstellt wird [1, 2], **BILD 1** (links).

Zur Maximierung der Stellkraft und Minimierung des Leistungsbedarfs wird eine Doppelbalg-Luftfeder mit einer kreisringförmigen Gesamttragfläche und zwei gegenläufig verstellbaren Abrollkolben verwendet, **BILD 1** (rechts). Um die Gesamttragfläche zu vergrößern, wird die Tragfläche des oberen Abrollkolbens durch Ausfahren des Aktors vergrößert und gleichzeitig die untere durch Einfahren des zweiten Aktors verkleinert. Die beiden Aktoren werden mit einem doppeltwirkenden Zylinder gemeinsam angesteuert. Durch Verfahren des Zylinders wird jeweils eine Druckkammer vergrößert und eine verkleinert – ein Aktor fährt ein und der andere aus. Die Hydraulik ist trocken, da die Kammern geschlossen und leakagefrei sind. Der Antrieb des Zylinders erfolgt hydraulisch oder elektromechanisch. Das Konzept ermöglicht eine Regeneration der beim selbsttätigen Einfahren eines Aktors abgege-

Variable	Einheit	Beschreibung
$A_T$	mm <sup>2</sup>	Luftfedertragfläche
$\alpha_F$	m/(s <sup>2</sup> N)	Gewichtungsfaktor
$c_A$	N/m	Aufbausteifigkeit
$c_R$	N/m	Radsteifigkeit
$d_A$	Ns/m	Aufbaudämpfung
$d_R$	Ns/m	Raddämpfung
$F$	N	Axialkraft
$F_R$	N	Radlastschwankung
$F_{R,0}$	N	Statische Radlast
$K$	–	Strukturebschränkung des Reglers
$K$	–	Regler
$m_A$	kg	Aufbaumasse (Viertelfahrzeug)
$m_R$	kg	Radmasse
$n$	1	Normiertes weißes Rauschen
$n_y$		Messrauschen (Einheit von Messgröße abhängig)
$p$	bar (absolut)	Luftfederdruck
$p_u$	bar (absolut)	Umgebungsdruck
$r_A$	mm	Radius der Luftfederaußenführung
$r_K$	mm	Luftfederabrollkolbenradius
$\sigma_{F_R}$	N	Standardabweichung der Radlastschwankung
$\sigma_{u_{\text{Aktor}}^{\text{max}}}$	N	Maximal zulässige Standardabweichung der Aktorstellgröße
$\sigma_{z_A}$	m/s <sup>2</sup>	Standardabweichung der Aufbaubeschleunigung
$\sigma_{z,\text{max}}$	m	Maximal zulässige Standardabweichung der Einfederung
$u_{\text{Aktor}}$	N	Aktorstellgröße
$z$	m	Einfederung
$z_A$	m	Aufbauweg
$\dot{z}_A$	m/s	Aufbaugeschwindigkeit
$z_R$	m	Radweg
$z_s$	m	Weg der Straßenanregung
$\dot{z}_s$	m/s	Geschwindigkeit der Straßenanregung
$\ddot{z}_s$	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigung der Straßenanregung
$y \leftarrow u$	[y]/[u]	Übertragungsfunktion von u auf y

**TABELLE 1** Erläuterung der verwendeten Formelzeichen  
(© Technische Universität Darmstadt)



**BILD 1** Aktiver Abrollkolben zur Verstellung der Tragfläche der Luftfeder (links) und der Funktionsprototyp der aktiven Luftfeder mit zwei gegenläufig verstellbaren Abrollkolben (rechts)  
 (© Technische Universität Darmstadt)

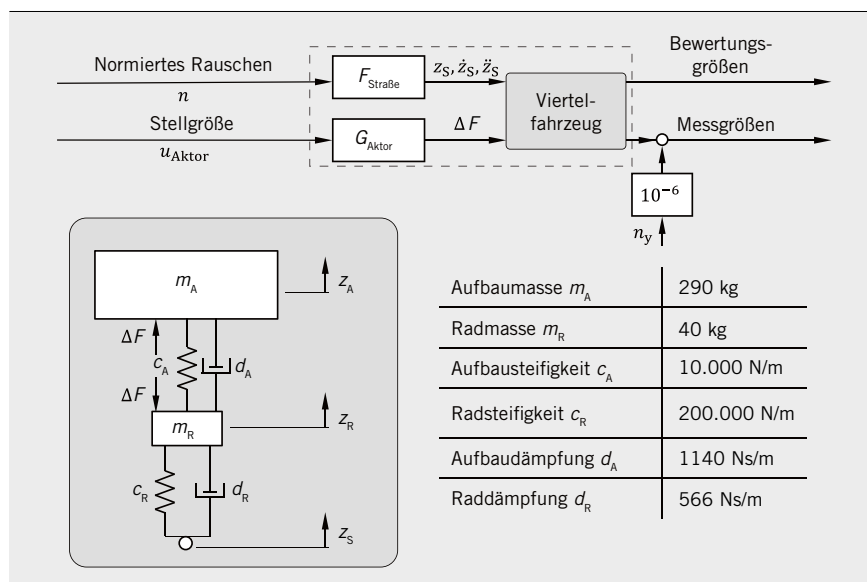
benen Energie. Diese wird direkt dem ausfahrenden Aktor zugeführt und von dem Antrieb müssen nur Differenzkräfte gestellt werden. Im Versuch wurde so der Gesamtenergiebedarf des Systems um mehr als 30 % gesenkt. Dies ist bei einem konventionellen hydraulischen Antrieb nicht möglich. Entweder muss die bei Zugbelastung abgegebene Energie aufwendig in einem Speicher zwischengespeichert werden (Rekuperation) oder sie fließt ungenutzt als Wärmeenergie in den Tank. Die Stellkraft des Funktionsprototyps der aktiven Luftfeder ist  $\pm 1000 \text{ N}$  bei einer statischen Last von  $2850 \text{ N}$ . Das System ist teiltragend. Die Lastanpassung erfolgt über eine Variation des Luftfederdrucks und eine Individualisierung der Regelung gemäß dem Resilienzprinzip „One size fits all“.

### 3 MODELLBASIERTER FAHRWERKSREGLERENTWURF

Um die Auswirkung unterschiedlicher Kenngrößen des Aktors, wie Stellkraft oder Stellfrequenz, sowie den Einfluss der Regelung auf die beiden Bewertungsgrößen Fahrkomfort und Fahrsicherheit zu quantifizieren, wurden Untersuchungen am Viertelfahrzeug durchgeführt, **BILD 2**. Damit kann die ideale Auslegung des aktiv geregelten Fahrwerks als mathematisches Optimierungsproblem in der Form

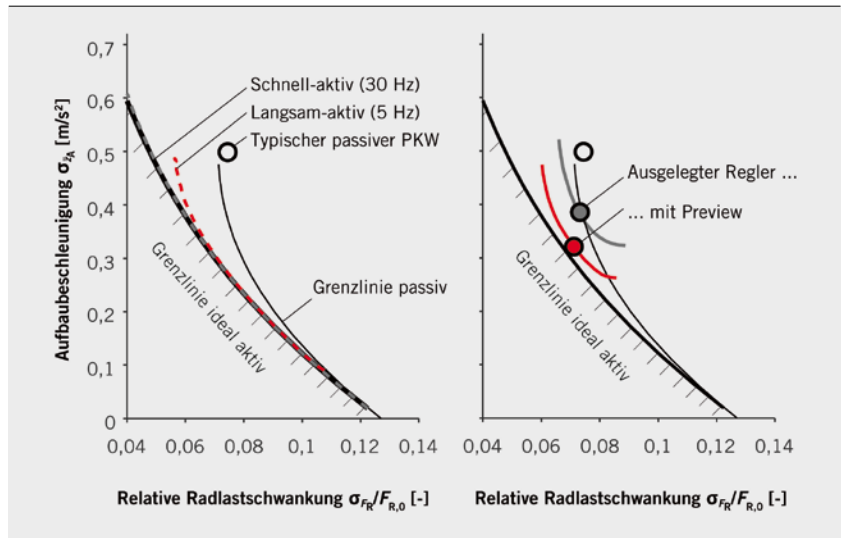
$$\text{Gl. 2} \quad \min_{\mathbf{K} \in \mathbf{K}} (\|\ddot{z}_A \leftarrow \mathbf{n}\|_2^2 + \alpha_F^2 \|\mathbf{F}_R \leftarrow \mathbf{n}\|_2^2)$$

unter der Bedingung



**BILD 2** Viertelfahrzeugmodell und Modell für die Auslegung der Fahrdynamikregelung  
 (© Technische Universität Darmstadt)

**BILD 3** Grenzkurven für verschiedene Aktorkonfigurationen bei einer maximalen Stellkraft von 1 kN (links) und Grenzkurve für den Prototyp der aktiven Luftfeder mit unterschiedlichen Reglerkonfigurationen (rechts, grau: Skyhook-Regler, rot: Skyhook-Regler mit Vorsteuerung) (© Technische Universität Darmstadt)



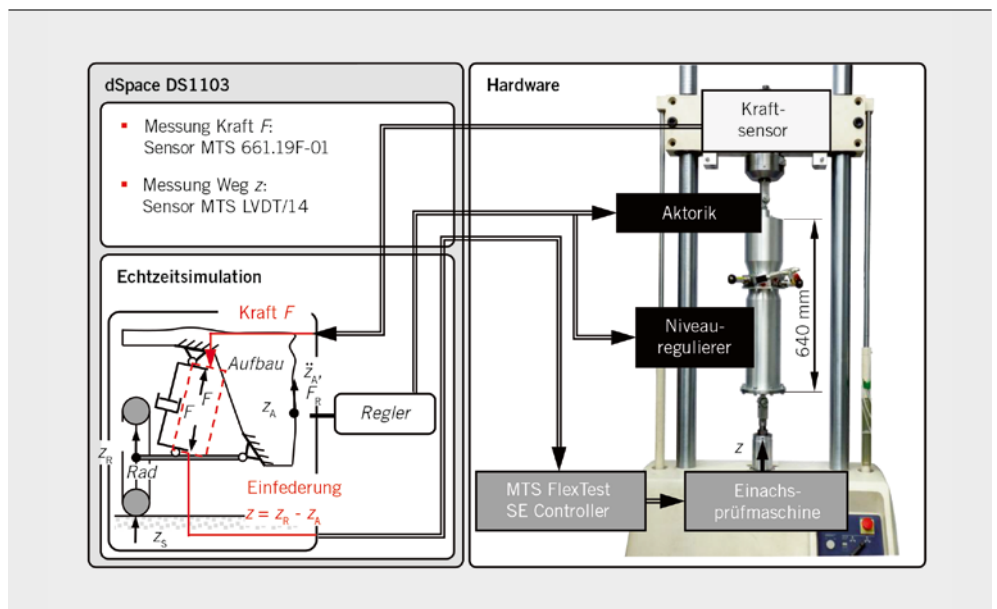
**Gl. 2a**  $\|z - n\|_2 < \sigma_{z, \max}, \|u_{\text{Aktor}} - n\|_2 < \sigma_{u_{\text{Aktor}}, \max}$

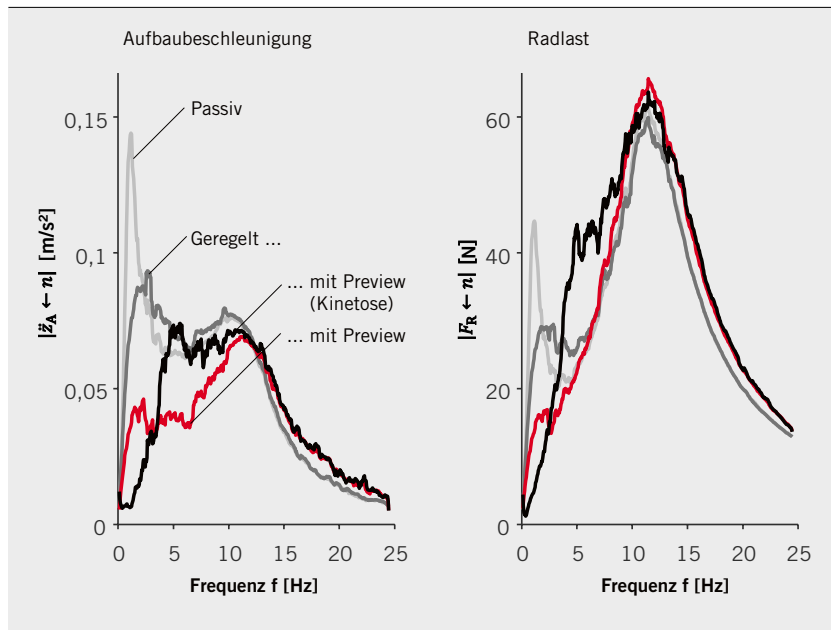
beschrieben werden. Die Maximierung des Fahrkomforts und der Fahrsicherheit wird als Minimierung der  $H_2$ -Normen der Übertragungsfunktionen der Aufbaubeschleunigung und der Radlastschwankung formuliert. Diese entsprechen bei geeigneter Modellierung der Anregung den entsprechenden Standardabweichungen. Da es sich um eine Pareto-Optimierung handelt, kann die Gewichtung zwischen den beiden Zielgrößen über den Parameter  $\alpha_F$  verschoben werden. Über  $K$  ist dabei eine geeignete Strukturbeschränkung des Reglers gegeben, wie zum Beispiel die Beschränkungen auf statische Rückführungen. Die Einfederung  $z$  und die Stellgröße  $u_{\text{Aktor}}$  werden bezüglich ihrer Standardabweichung auf ein Drittel der Maximalwerte beschränkt. Nähert man die Nebenbedingungen über zusätzliche Terme in der Gütefunk-

tion an, kann der optimale Regler direkt berechnet werden. Andernfalls muss das Optimierungsproblem, Gl. 2, numerisch gelöst werden. Ergebnis der Optimierung sind Pareto kurven. Sie repräsentieren Grenzkurven, die unter den gegebenen Bedingungen gemäß dem Motto „Besser geht’s nicht...“ nicht unterschritten werden können.

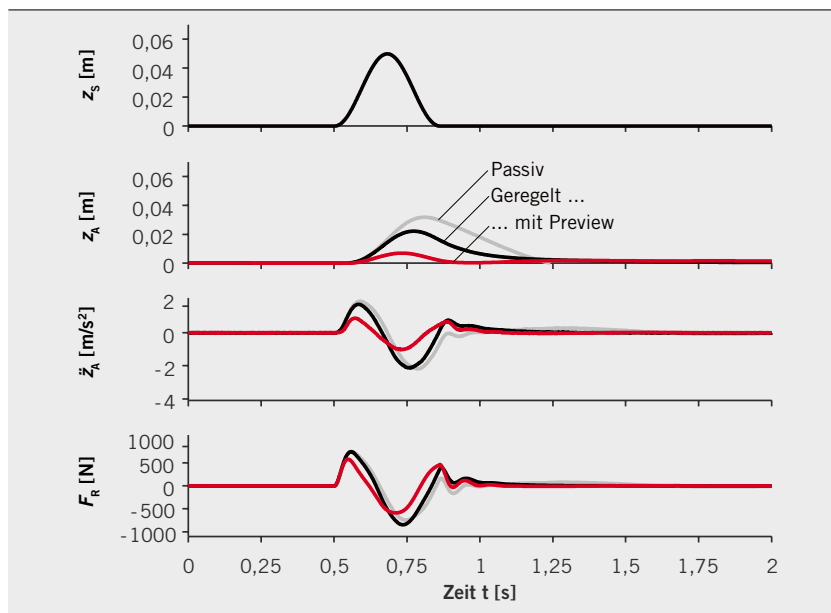
Zur Untersuchung des Einflusses der Aktordynamik wurde das Übertragungsverhalten des Aktors als  $PT_1$ -Glieder mit der Eckfrequenz von 5 Hz für ein typisches langsam-aktives System und von 30 Hz für ein schnell-aktives System modelliert. Wie im Konflikt- diagramm gezeigt, **BILD 3** (links), müssen bei einer Stellkraft von 1 kN mit dem schnell-aktiven System gegenüber einem idealen Aktor fast keine Abstriche gemacht werden. Sowohl der Fahrkomfort als auch die Fahrsicherheit werden deutlich verbessert. Das langsam-aktive System wird vor allem zur Steigerung des Fahrkomforts eingesetzt. Die Übertragungsfunktion des Aktors der

**BILD 4** Prinzipieller Aufbau bei den HiL-Versuchen mit der aktiven Luftfeder (© Technische Universität Darmstadt)





**BILD 5** In HiL-Versuchen gemessene Vergrößerungsfunktionen der Aufbaubeschleunigung und der Radlast des Viertelfahrzeugs mit aktiver Luftfeder bei Überfahrt einer typischen Bundesstraße mit 100 km/h  
(© Technische Universität Darmstadt)



**BILD 6** HiL-Versuchsergebnisse für die Überfahrt einer Cosinusflanke mit 10 km/h  
(© Technische Universität Darmstadt)

aktiven Luftfeder wurde experimentell identifiziert und bei dem Reglerentwurf berücksichtigt. Ergebnis ist ein optimaler dynamischer Regler zehnter Ordnung, der allerdings aus Gründen der Robustheit nicht in der Praxis verwendet wird. Für die Versuche am Prüfstand wurde auf eine einfache Skyhook-Regelung, bei der die Aufbau- und Einfederungsgeschwindigkeit statisch zurückgeführt werden, implementiert. Um die Leistungseinbußen aufgrund der einfachen Regelung zu kompensieren, wurde zusätzlich eine Preview-Regelung, bei der die Straßenanregung für eine Vorsteuerung genutzt wird [3], verwendet, **BILD 3** (rechts). Mit der aktiven Luftfeder ist in diesem Fall eine Verbesserung des Fahrkomforts um 35 % bei einer minimalen Verbesserung der Fahrsicherheit möglich. Ähnliche Ergebnisse konnten für andere Anregungen und Systemparameter erzielt werden [3].

#### 4 AKTORVALIDIERUNG IN HARDWARE-IN-THE-LOOP-EXPERIMENTEN

Um die aktive Luftfeder im Viertelfahrzeug experimentell zu untersuchen, wurden Hardware-in-the-Loop(HiL)-Versuche durchgeführt. Bei diesen Versuchen wird die Luftfeder mit einem virtuellen Viertelfahrzeug, das parallel in einer Echtzeitsimulationsumgebung von dSpace simuliert wird, gekoppelt, **BILD 4**. Die in der Echtzeitsimulation berechnete Einfederung der Luftfeder wird an die Prüfmaschine übermittelt, die sie über eine interne Regelung einstellt. Die gemessene Axialkraftantwort  $F$  wird in die Simulation zurückgeführt (Closed Loop Simulation). Der Regler wird ebenfalls in dem Simulationsmodell abgebildet. HiL-Versuche bieten den Vorteil, dass bereits in einer frühen Phase der Entwicklung die Wechsel-

wirkungen der aktiven Luftfeder mit dem Gesamtsystem untersucht werden können. Außerdem besteht die Möglichkeit, Parameter des virtuellen Systems einfach zu variieren und somit die aktive Luftfeder bei unterschiedlichen Testszenarien (unterschiedliche Beladungen, Anregungen etc.) zu untersuchen.

In **BILD 5** sind die Vergrößerungsfunktionen für die Aufbaubeschleunigung und die Radlastschwankung, die aus den HiL-Versuchsergebnissen berechnet wurden, für die Überfahrt der Bundesstraße für unterschiedliche Konfigurationen dargestellt. Neben dem ausgelegten Regler mit Preview, **BILD 3** (rechts), wurde eine zweite Reglerkonfiguration verwendet, um insbesondere niederfrequente Schwingungen, die Kinetose verursachen, zu mindern. Diese frequenzspezifische Bewertung der Aufbaubeschleunigung wurde bereits beim Reglerentwurf in Form von Bewertungsgewichten nach der VDI-Richtlinie 2057 berücksichtigt. Im Vergleich zur passiv betriebenen Luftfeder wird deutlich, dass im aktiven Betrieb die Beschleunigung des Aufbaus in der Eigenfrequenz verringert wird. Dies könnte zu einer Verringerung des Auftretens von Kinetose führen. Der Leistungsbedarf für die Konfiguration mit Preview beträgt im Mittel circa 100 W.

Neben den HiL-Versuchen mit stochastischer Straßenanregung wurden Einzelhindernisse überfahren. In **BILD 6** sind die gemessenen Zeitschriebe für die Überfahrt einer Cosinusflanke der Höhe 50 mm mit 10 km/h dargestellt. Mit der aktiven Luftfeder mit Preview-Regelung wird eine Minimierung der maximalen Aufbaubeschleunigung um 53 % und der Radlastschwankung um 23 % im Vergleich zur passiven Luftfeder erreicht.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

An der Technischen Universität Darmstadt wurde eine aktive Luftfeder mit verstellbaren Abrollkolben entwickelt. In HiL-Versuchen wurde gezeigt, dass Kinetose verursachende Aufbauschwingungen gemindert werden und der Fahrkomfort gesteigert wird. Es wurden

grundlegende Untersuchungen zur Optimalregelung eines aktiven Fahrwerks und der Einfluss unterschiedlicher Aktorkonfigurationen auf den erreichbaren Fahrkomfort und die Fahrsicherheit am Viertelfahrzeug vorgestellt.

Zukünftig wird auf die hydraulische Dämpfung verzichtet und eine pneumatische Dämpfung in die aktive Luftfeder integriert. Außerdem wird an alternativen Bauformen der aktiven Luftfeder geforscht – einer niedrigbauenden aufgelösten Bauweise und einer semiaktiven Luftfeder mit verstellbarem Abrollkolben. Diese Konzepte sind für den Einsatz in Elektrofahrzeugen und Transportern geeignet.

## LITERATURHINWEISE

- [1] Hedrich, P.; Johe, M.; Pelz, P. F.: Design and Realization of an Adjustable Fluid Powered Piston for an Active Air spring. In: 10<sup>th</sup> International Fluid Power Conference, 2016, Band 1, S. 571–582
- [2] Hedrich, P.; Lenz, E.; Brötz, N.; Pelz, P. F.: Active Pneumatic Suspension for Future Autonomous Vehicles: Design, Prove of Concept and Hardware-in-the-Loop Simulations. In: 11<sup>th</sup> International Fluid Power Conference, 2018, Band 3, S. 352–365
- [3] Lenz, E.; Hedrich, P.; Pelz, P. F.: Aktive Luftfederung – Modellierung, Regelung und Hardware-in-the-Loop-Experimente. In: Forschung im Ingenieurwesen, April 2018

## DANKE

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Finanzierung dieser Forschung im Sonderforschungsbereich 805 „Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus“ und dem Projektpartner Vibracoustic.



## READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: [www.atz-worldwide.com](http://www.atz-worldwide.com)

Das Magazin für  
den Leichtbau  
bewegter Massen

Jetzt gratis  
testen!

[www.meinfachwissen.de/LWD](http://www.meinfachwissen.de/LWD)

lightweight.design  
Die Fachzeitschrift für den Leichtbau bewegter Massen

Konturböhen  
Bearbeitung von CFK-Titan-Stacks

Design-Verfahren  
Wärmebehandlung  
von Alu-Schalen

Schweißnaht  
Reparatur eines ultraleichten  
Hauptaggregats

Leichtes  
Industriell gefertigtes  
von CFK-Profilen