



© Wittke | FKFS

Ganzheitliche Fahrzeugdynamik unter Laborbedingungen

Bisher war eine ganzheitliche Untersuchung der Längs-, Quer- und Vertikaldynamik von Fahrzeugen mit Prüfständen nicht realisierbar. Der Fahrzeugdynamikprüfstand des IVK der Universität Stuttgart in Kooperation mit dem FKFS ermöglicht es erstmals, den klassischen Fahrversuch besser zu unterstützen, das Zusammenspiel neuartiger Antriebs- und Fahrwerkskonzepte zu erproben und die Applikation von Fahrdynamikregelsystemen zu beschleunigen.

HERAUSFORDERUNG

Zu keinem anderen Zeitpunkt wurden virtuelle Methoden in der Kraftfahrzeugentwicklung so intensiv genutzt wie heute. Gleichzeitig wurden noch nie so viele Prüfstände konzipiert und gebaut. Dies zeigt, dass der virtuelle Entwick-

lungsprozess den klassischen nicht ersetzt, sondern weiterhin ergänzt und begleitet. Verlässliche virtuelle Methoden und eine immer engere Verzahnung von Simulation und Realversuch sind zentral, um die wachsende Komplexität moderner Fahrzeuge vor dem Hintergrund verkürzter Entwicklungs-

zyklen und erweiterter Portfolios zu beherrschen. Ferner rückt die ganzheitliche Betrachtung von Längs-, Quer- und Vertikaldynamik aufgrund innovativer Fahrdynamikregel- und Fahrerassistenzsysteme zur Verbesserung der Fahreigenschaften und des Komforts in den Vordergrund.

AUTOREN



Alexander Ahlert, M. Sc.
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter
im Bereich Fahrzeugtechnik und
Fahrndynamik am IVK der
Universität Stuttgart.



Dr.-Ing. Werner Krantz
ist Gruppenleiter im Bereich Fahr-
zeugtechnik und Fahrndynamik am
IVK der Universität Stuttgart.



Dr.-Ing. Jens Neubeck
ist Leiter des Bereichs Fahrzeug-
technik und Fahrndynamik am FKFS
in Stuttgart.



Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner
ist Inhaber des Lehrstuhls Kraft-
fahrwesen am IVK der Universität
Stuttgart und Mitglied des
Vorstandes des FKFS.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen und eine weitere Brücke zwischen der Simulation und dem Fahrversuch zu schlagen, entstand am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart in Kooperation mit dem Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) sowie der MTS Systems Corporation der neue Stuttgarter Fahrzeugdynamikprüfstand, der im Dezember 2018 in Betrieb genommen wurde. Er ermöglicht es, hochdynamische Versuche zur ganzheitlichen Fahrzeugdynamik, also der gekoppelten Längs-, Quer- und Vertikaldynamik, unter Laborbedingungen durchzuführen.

TECHNIK

Beim Stuttgarter Fahrzeugdynamikprüfstand steht das Fahrzeug auf vier Flachbandsystemen, die über integrierte Elektromotoren angetrieben sowie abgebremst und durch hydraulische Aktoren um die Hochachse gedreht werden können. Dadurch kann die Relativbewegung der Räder zur Fahrbahn dargestellt werden. Zudem können die Flachbänder über Hydraulikzylinder vertikal angeregt werden, um Fahrbahnebenenheiten aufzuprägen und Fahrwerk sowie Lenkung so in einen realistischen Betriebszustand zu

versetzen. Das Fahrzeug kann sowohl geschleppt als auch über den eigenen Triebstrang angetrieben werden. Die Bedienung des Fahrzeugs erfolgt durch einen Fahrroboter. Künftig wird sie auch durch einen menschlichen Fahrer realisierbar sein.

Je nach Untersuchungsgegenstand kann der Fahrzeugaufbau durch unterschiedliche Fesselungssysteme auf dem Prüfstand gehalten werden. Das Center of Gravity Restraint (CGR) fesselt das Fahrzeug virtuell in Schwerpunktposition und ermöglicht dabei die Freiheitsgrade Wanken, Nicken und Huben. Durch integrierte biaxiale Kraftsensoren werden die Reaktionskräfte in Längs- und Querrichtung sowie das resultierende Reaktionsmoment um die Hochachse zwischen dem Fahrzeugaufbau und dem CGR gemessen. Diese Größen werden vom Prüfstandsregelungssystem genutzt, um die Flachbandeinheiten individuell so zu steuern, dass eine vergleichbare Relativbewegung zwischen Reifen und Fahrbahn entsteht wie beim Fahrversuch auf der Straße. Vier hydraulische Aktuatoren an der CGR-Befestigung ermöglichen weiterhin, eine Vertikalkraft sowie ein Wank- und Nickmoment aufzuprägen, um etwa Luftkräfte zu simulieren. Damit kann der Fahrversuch so realitätsnah wie nur möglich auf den Prüfstand geholt werden.

Radstand	2000 bis 3800 mm
Spurweite	1200 bis 1900 mm
Fahrgeschwindigkeit	0 bis 220 km/h
Maximale Längsbeschleunigung / Abbremsung (fahrzeugabhängig)	circa 2 g
Längsdynamische Frequenzbandbreite	> 15 Hz
Maximale Leistung / Dauerleistung pro Motor	220 kW / 140 kW
Übertragbare Reifenkraft pro Rad in Längs- / Quer- / Vertikalrichtung	6 kN / 10 kN / 15 kN
Beschleunigung des Vertikalaktors	+ 7 / - 9 g
Verfahrweg des Vertikalaktors	± 75 mm
Frequenzbandbereich der Vertikalaktoren	30 Hz
Lenkwinkelbereich des Flachbands	± 20 °
Maximale Lenkwinkelgeschwindigkeit des Flachbands	80 °/s
Frequenzbandbereich der Lenkaktoren	15 Hz
Zugelassene Reaktionsgrößen im CGR: Längskraft / Querkraft / Giermoment	30 kN / 30 kN / 45 kNm
Maximale Vertikalkraft / Nickmoment / Wankmoment durch Down-Force-Aktuatoren des CGR	11,6 kN / 3,0 kNm / 7,4 kNm

TABELLE 1 Leistungsdaten des Prüfstands (© FKFS)

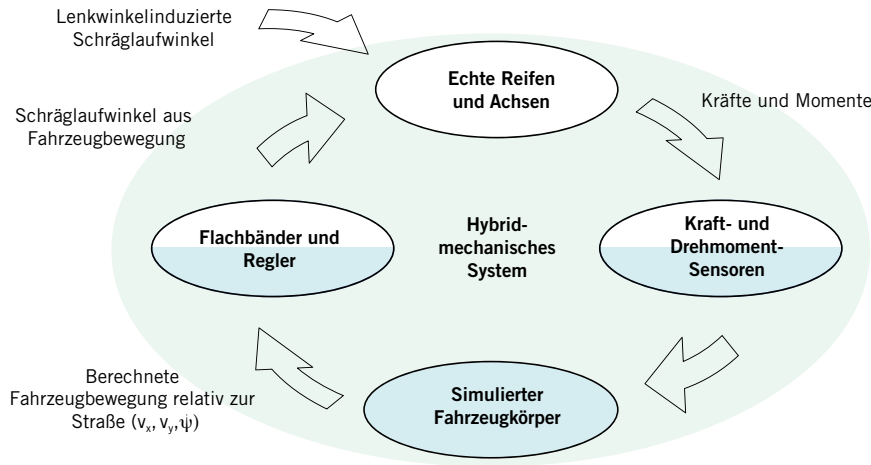


BILD 1 Grundsätzliches Funktionsprinzip zur Durchführung von Fahrmanövern (© FKFS)

Neben dem CGR-Fesselungssystem kann das Fahrzeug auch durch ein klassisches Stabsystem (3-Link-Res-traint) gehalten werden. Für Anwendungen mit verstärktem Fokus auf der

Vertikaldynamik ist auch eine Fesselung des Fahrzeugs durch Seilabspannung denkbar. In **TABELLE 1** sind grundlegende Leistungsdaten des Prüfstands aufgeführt.

FUNKTIONSWEISE UND BETRIEBSARTEN

Durch das modulare Software- und Regelungskonzept, das in [1] ausführlich beschrieben ist, kann der Fahrzeugdynamikprüfstand auf unterschiedliche Weise betrieben und genutzt werden. Im Wesentlichen gibt es drei Betriebsmodi: den Road-Load-Mode, den Road-Speed-Mode und den User-Mode.

Mit dem Road-Load-Mode ist es möglich, realistische, ganzheitliche Fahrmanöver durchzuführen. Ändern sich die Reifenschlupfzustände durch fahrzeugseitige Lenkradwinkeländerungen, Antriebs- oder Bremsmomente, werden die daraus resultierenden Reifenkräfte durch die entsprechenden Reaktionsgrößen des Fesselungssystems abgestützt. Diese Reaktionsgrößen werden durch Sensoren erfasst und dazu genutzt, die Bewegung der gesperrten Freiheitsgrade des Fahrzeugs in der Simulation zu berechnen. Diese virtuelle Fahrzeugbewegung wird dann in Steuerbefehle zur

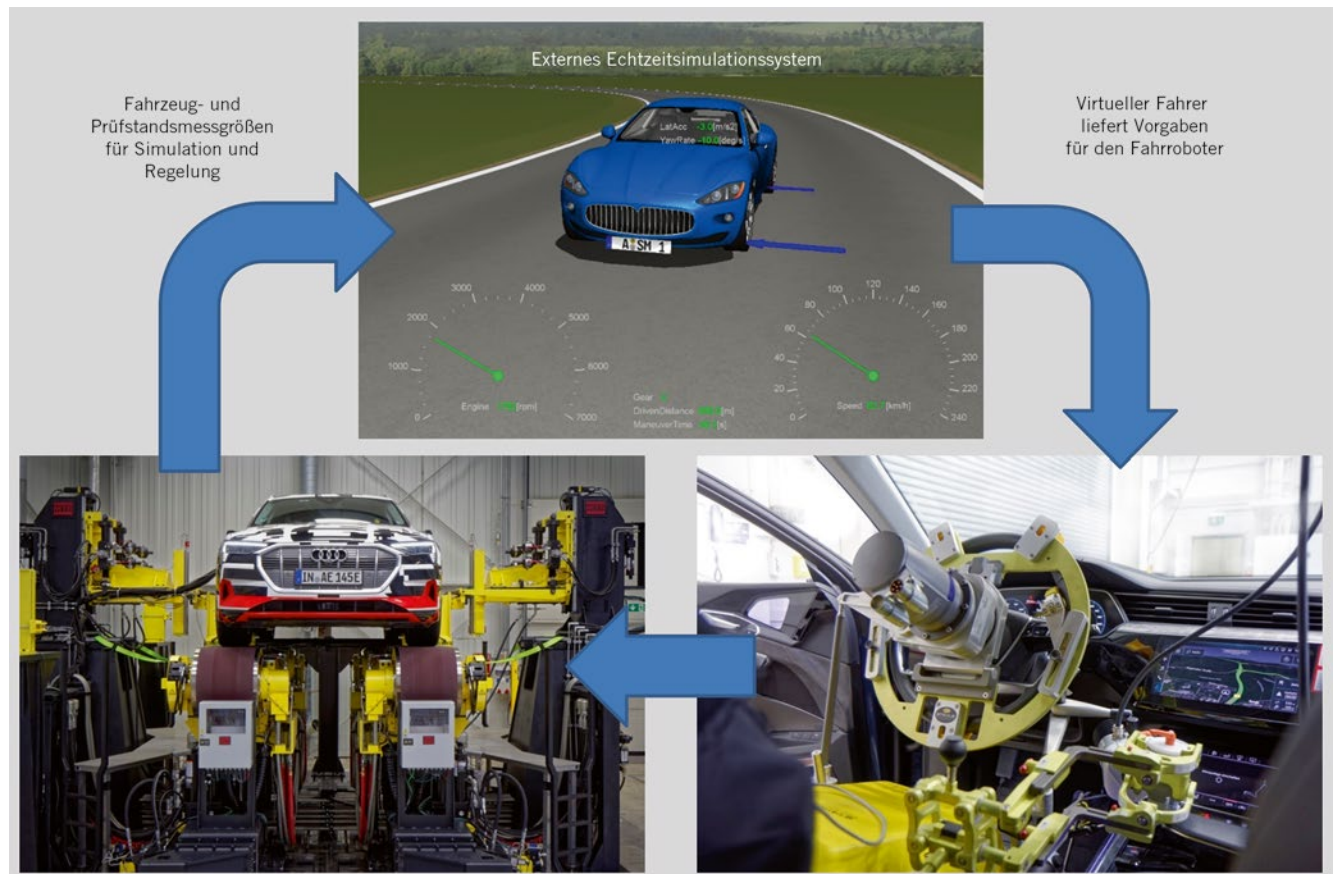


BILD 2 Veranschaulichung des mHIL-Prozesses für Closed-Loop-Fahrmanöver: Simulationsumgebung (© dSpace | FKFS), Audi e-tron Prototyp auf Fahrzeugdynamikprüfstand und Fahrroboter (© Wittke | FKFS)

Verdrehung der Flachbandeinheiten um die Hochachse (Bandwinkel) und zur Einstellung der Bandgeschwindigkeit umgerechnet. Hierbei ändern sich erneut die Schlupfzustände der Reifen und es entsteht ein Kreisprozess, **BILD 1**.

Hierdurch wird sichergestellt, dass die entstehenden Schlupfzustände stationär wie instationär zu denen einer realen Straßenfahrt vergleichbar sind. Zusammengefasst entsteht zur Durchführung von realitätsnahen Fahrmanövern ein hybrid-mechanisches System, das sich aus der Kopplung des realen Systems Fahrzeug auf dem Prüfstand mit einem virtuellen Körper ergibt, der die Fahrzeugbewegung in den gesperrten Freiheitsgraden simuliert. Es können sowohl Open-Loop- als auch Closed-Loop-Fahrmanöver getestet werden. Um Closed-Loop-Manöver mit dem Fahrer zu ermöglichen, wird ein zusätzliches externes Echtzeitsimulationssystem verwendet, um eine Umgebungs-, Strecken- und Fahrermodellierung zu realisieren. Dieses Vorgehen wird von MTS als mechanical Hardware-in-the-Loop (mHiL) bezeichnet.

Im Road-Speed-Mode ergeben sich die Aktuatorbewegungen nicht aus einer Umgebungs- und/oder Fahrersimulation gemäß **BILD 1** und **BILD 2**, sondern werden durch vorgegebene Zeitsignale oder mittels Funktionsgeneratoren gesteuert. Hiermit lassen sich nahezu beliebig überlagerte Anregungen realisieren, die spezifische Tests ermöglichen oder auch der Parameteridentifikation dienen können und im Fahrversuch auf der Straße so nicht möglich sind.

Weitestgehende Flexibilität bietet der User-Mode. Hier wird es dem Nutzer ermöglicht, eigene Algorithmen zur Ansteuerung und Regelung zu entwickeln oder zusätzliche Sensorik zu integrieren. Gleichzeitig können eigene Algorithmen mit den bestehenden Funktionen von MTS verbunden werden. Hierdurch wird ein Höchstmaß an Anpassungsmöglichkeit auch an künftige Forschungsaufgaben und Anwendungsfälle sichergestellt.

ANWENDUNGEN

Eine wichtige Gruppe von Anwendungsfällen legt den Schwerpunkt auf die Entwicklung und Bewertung der ganzheitlichen Fahrzeugdynamik [2].

Die längs-, quer- und vertikaldynamischen Fahrzeugeigenschaften können mithilfe des Fahrzeugdynamikprüfstands nicht nur isoliert untersucht werden, sondern es wird eine detaillierte und reproduzierbare Betrachtung der Wechselwirkungen möglich. Neben dem Gesamtfahrzeugverhalten können auch Subsysteme wie das Lenkungs- und Bremssystem oder der Antriebsstrang entwickelt sowie erprobt und die dazugehörigen Steuergeräte appliziert werden.

Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Entwicklung und Zertifizierung von aktiven Systemen. Es beinhaltet Systeme wie ESP, aktive Lenksysteme und Fahrwerke oder integrierte Fahrdynamikregelsysteme. Ferner können Funktionen aus dem Bereich der Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) oder dem autonomen Fahren unter sicheren Bedingungen getestet werden [3].

Die leistungsfähige Aktuatorik und die Flexibilität hinsichtlich Fahrzeugfesselung und Regelungskonzept ermöglicht generell ein breites Spektrum an Anwendungsfällen für den Fahrzeugdynamikprüfstand. Das IVK/FKFS sieht seine Aufgaben insbesondere darin, im Rahmen eigener Forschungsaktivitäten sowie von Kooperationsprojekten das Anwendungsspektrum weiter zu vergrößern und entsprechende Best Practices bereitzustellen. Vor diesem Hintergrund wurde eine strategische Allianz zwischen MTS und dem IVK/FKFS etabliert [2, 3]. Mittelfristiges Forschungsziel ist beispielsweise die Etablierung von Methoden zur schnellen Modellbildung und Parameteridentifikation zur Unterstützung des virtuellen Entwicklungsprozesses. Wichtiger Punkt ist zudem eine grundlegende Untersuchung und gegebenenfalls Kompensation existierender Unterschiede zwischen dem Fahrversuch auf der Straße und auf dem Fahrzeugdynamikprüfstand. Entscheidend sind hierbei der Einfluss der Fahrzeugfesselung und der Reifen-Fahrbahn-Kontakt. Eine Darstellung erster Forschungsarbeiten findet sich in [1] und [4].

BEISPIELE

Aus dem breiten Nutzungsspektrum sollen nachfolgend zwei querdynamische Anwendungsbeispiele vorgestellt werden. Als Testfahrzeug wurde nicht



AUTO RELOADED ODER:

WARUM WIR WIEDER VON VORN ANFANGEN

Die Herausforderungen der E-Mobilität bedeuten vor allem: bestehende Technologien nicht nur weiter, sondern ganz neu zu denken. Dabei erfordert die Antriebsentwicklung die enge Zusammenarbeit von Engineering und IT. M Plan kombiniert das Spezialwissen beider Disziplinen – und verschafft seinen Kunden einen wertvollen Vorsprung auf dem Weg zur Mobilität von morgen.

M PLAN GMBH
Oskar-Schindler-Straße 3, 50769 Köln
Fon +49 221 33734-0, Fax +49 221 33734-190
info@m-plan.com



Besuchen Sie uns auf:



m-plan.com

das oben abgebildete Fahrzeug verwendet, sondern ein Fahrzeug der Kompaktklasse.

Als erstes Beispiel sind in **BILD 3** Ergebniskurven einer quasistationären Kreisfahrt zur Analyse des Eigenlenkverhaltens in Anlehnung an die ISO 4138 zu sehen. Dargestellt ist der Lenkradwinkel über der Querbeschleunigung. Die Längsgeschwindigkeit des Fahrzeugs wurde bei 100 km/h konstant gehalten

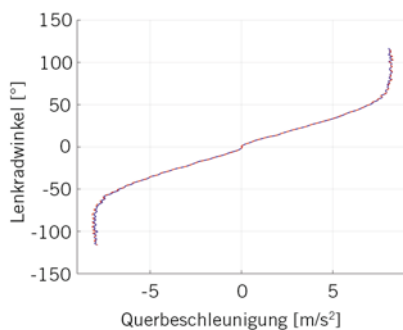


BILD 3 Versuchsergebnisse von vier quasistationären Kreisfahrten: Lenkradwinkel über Querbeschleunigung, jeweils Lenkung aus der Mittellage bis in den Grenzbereich hinein (© FKFS)

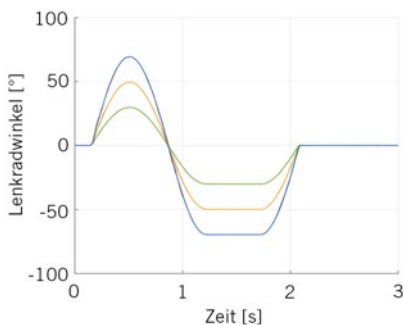


BILD 4 Lenkradwinkelvorgaben der Sine-with-Dwell-Manöver bei drei unterschiedlichen Lenkradwinkelamplituden (© FKFS)

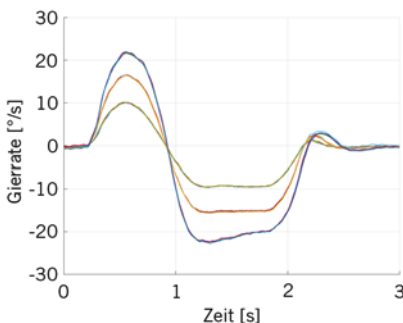


BILD 5 Gemessene Verläufe der Gierrate der Sine-with-Dwell-Manöver bei drei unterschiedlichen Lenkradwinkelamplituden mit Wiederholungsmessungen zum Nachweis der Reproduzierbarkeit (© FKFS)

und es wurde mit einer konstanten Lenkradwinkelrampe bis in den Grenzbereich hinein gelenkt. Insgesamt wurden vier Versuche durchgeführt. Zweimal wurde nach links und zweimal wurde nach rechts gelenkt. Dabei wurden die Versuche in definierten Zeitabständen durchgeführt, um vergleichbare Reifentemperaturen zu gewährleisten. Damit die Ergebnisse möglichst realitätsnah sind, wurde zudem eine stochastische Vertikalanregung aufgebracht, die einer realen Fahrbahnanregung entspricht. Hieraus resultieren die in **BILD 4** bei hohen Querbeschleunigungen erkennbaren Schwingungen, die im Bereich der Gierereigenfrequenz des Fahrzeugs liegen. Die Ergebnisse sind tiefpassgefiltert. Um die Mittellage der Lenkung ist der Einfluss der Nichtlinearitäten in der Lenkanlage zu erkennen. Neben dem untersteuernden Fahrzeugverhalten zeigen die Ergebnisse eine sehr gute Reproduzierbarkeit.

Das zweite Beispiel ist ein dynamisches Sine-with-Dwell-Fahrmanöver [5], das zum Beispiel zur Analyse und Applikation von ESP-Funktionen genutzt wird. Insgesamt wurden 15 Versuche durchgeführt, jeweils fünf mit einer Lenkradwinkelamplitude von 30°, 50° und 70°. Erneut wurde eine stochastische Vertikalanregung aufgebracht. **BILD 4** zeigt die Verläufe der Lenkradwinkeleingabe und **BILD 5** die gemessenen Gieratenverläufe. Auch bei diesem dynamischen Manöver, das bei 70° Lenkradwinkelamplitude deutlich erkennbar den fahrdynamischen Grenzbereich berührt, ist eine hohe Reproduzierbarkeit gegeben.

Der Fahrzeugdynamikprüfstand wurde erst kürzlich in Betrieb genommen. Zeit- und witterungsbedingt geschuldet liegen noch keine detaillierten Vergleiche zwischen Fahrdynamikmessungen auf der Straße und auf dem Prüfstand vor. Dies ist zentraler Inhalt der anstehenden Untersuchungen und Gegenstand weiterer Veröffentlichungen.

LITERATURHINWEISE

[1] Ahlert, A.; Zeitvogel, D.; Neubeck, J.; Krantz, W.; Wiedemann, J.; Boone, F.; Orange, R.: Next generation 3D vehicle dynamics test system – Software and control concept. In: Bargende, M.; Reuss, H.-C.; Wiedemann, J. (Hrsg.): 18. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentechnik. Wiesbaden, 2018 (Proceedings), S. 23-38

[2] Neubeck, J.: Handling Roadway System – Next Generation 3D Vehicle Dynamics Test System. Test Facility Forum. Frankenthal, 2018

[3] Boone, F.; Neubeck, J.: Advanced development with the Flat-Trac Handling Roadway. MTS Lab Expert Seminar. Dresden, 2017

[4] Zeitvogel, D.; Ahlert, A.; Neubeck, J.; Krantz, W.; Wiedemann, J.; Boone, F.; Kan, W.: An Innovative Test System for Holistic Vehicle Dynamics Testing. In: SAE Technical Paper Series (2019), 2019-01-0449

[5] U.S. Department of Transportation – National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA): Federal Motor Vehicle Safety Standards: Electronic Stability Control Systems, Controls and Displays, FMVSS No. 126, Washington, 2007

DANKE

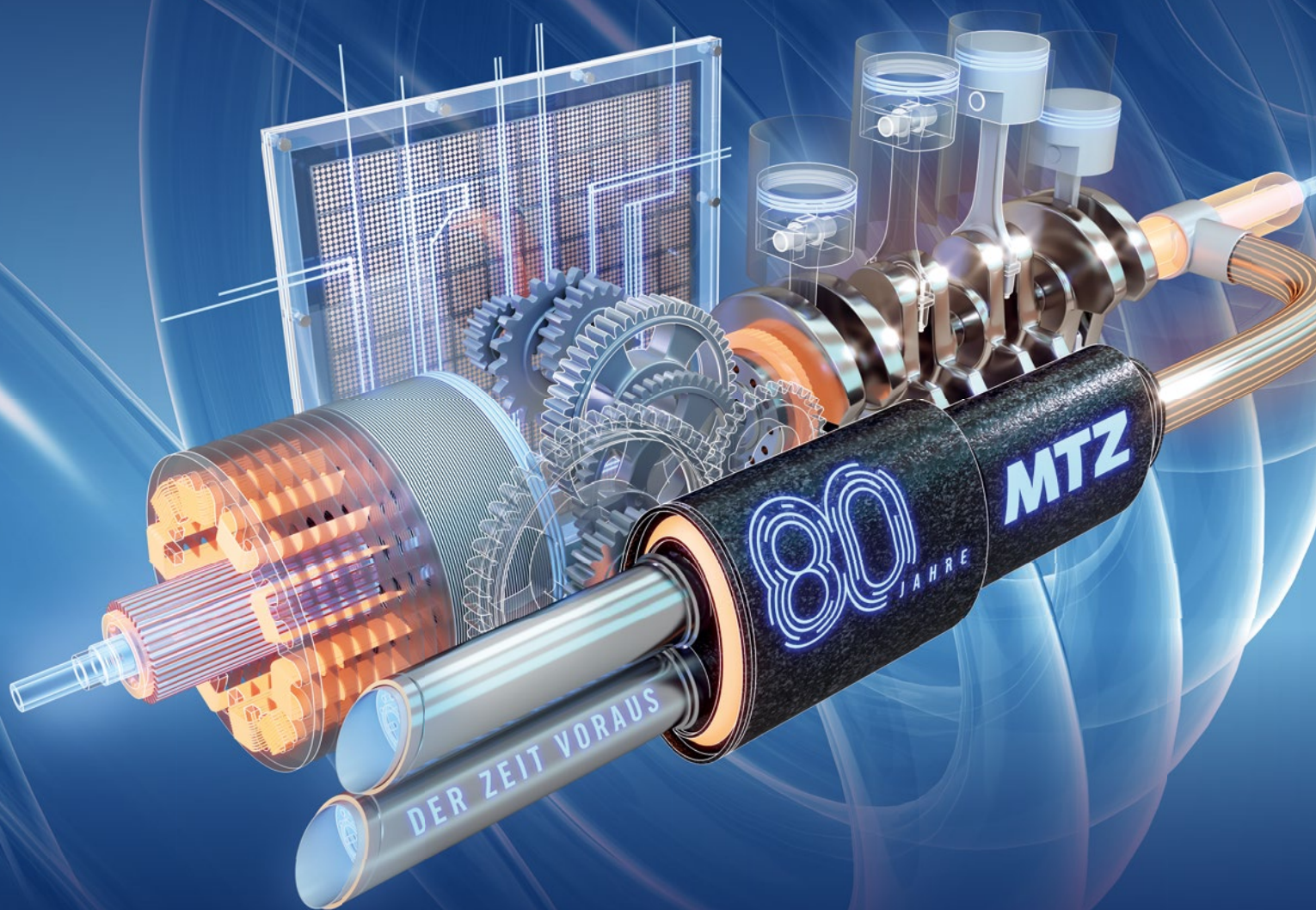
Der Fahrzeugdynamikprüfstand wurde als Forschungsgrößgerät nach Artikel 91b GG mit Mitteln der Universität Stuttgart, des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg und der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG realisiert. Herzlichen Dank. Die Autoren bedanken sich zudem bei der MTS Systems Corporation für die gute Zusammenarbeit im Zuge der Detailplanung und Implementierung sowie beim IVK und FKFS für ihren Einsatz, stellvertretend beim Co-Autor Dipl.-Ing. D. Zeitvogel. Ein weiterer Dank geht an die Audi AG für die Beistellung des Fahrzeugs. Ein besonderer Dank gilt dem Co-Autor Prof. Dr.-Ing. J. Wiedemann, pensionierter Lehrstuhlinhaber für Kraftfahrwesen am IVK und ehemaliges Mitglied des Vorstandes des FKFS, für die wissenschaftliche Weitsicht, die erfolgreiche Beantragung und verantwortliche Realisierung des Fahrzeugdynamikprüfstands.



DIESER BEITRAG IST IM E-MAGAZIN VERFÜGBAR UNTER:

www.emag.springerprofessional.de/atz

DER BLICK IN DIE ZUKUNFT.



Seit 80 Jahren begleitet MTZ erfolgreich die Entwicklung von Motor und Antriebsstrang. Das international führende technisch-wissenschaftliche Fachmagazin für Entscheider in der Antriebsentwicklung und -produktion versteht sich als eine Informationsplattform zu zukünftigen Antrieben – elektrisch und verbrennungsmotorisch. Die MTZ fördert auf Deutsch und Englisch, gedruckt und digital, den Informationstransfer zwischen Herstellern, Zulieferern, Dienstleistern sowie Forschungs- und Entwicklungszentren in aller Welt.



JETZT KOSTENLOS TESTEN

www.meinfachwissen.de/mtz/probe