



REALER KRAFTSTOFFVERBRAUCH UND MANÖVERBASIERTES TESTEN

Abgasrollenprüfstände sind als Werkzeug für Emissionstests, vorrangig für Homologationstätigkeiten, bekannt. Die hierbei durchgeführten Euro-6-Versuche weisen zumeist nur eine geringe Ähnlichkeit zu realen Straßenfahrten oder beispielsweise Fahrercharakteristika auf; zudem wird mit einfachen Fahrzeugmodellen und Fahrwiderständen operiert. TÜV Hessen, TU Darmstadt und AVL Zöllner zeigen, wie reale Straßenfahrten dennoch auf den Pkw-Allrad-Rollenprüfstand mit Simulationsumgebung transferiert werden können.

AUTOREN



PROF. DR. TECHN. CHRISTIAN BEIDL

ist Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe (VKM) der Technischen Universität Darmstadt.



DIPL.-ING. TILL WEBER

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe (VKM) der Technischen Universität Darmstadt.



DR.-ING. CHRISTOF GIETZELT

ist Geschäftsfeldleiter Projekte und Vertrieb beim TÜV Hessen Automotive in Darmstadt/Pfungstadt.



DR.-ING. TOBIAS DÜSER

ist Leiter der Softwareentwicklung und des Produktmanagements Software bei der AVL Zöllner GmbH in Bensheim.

ANSATZ

In diesem Beitrag werden die Fähigkeiten des neuartigen „4×4-Rollenprüfstands Advanced“ von AVL aus dem innovativen Gemeinschaftsprojekt von TÜV Hessen, TU Darmstadt und der AVL Zöllner GmbH vorgestellt. Zum ersten Mal erlaubt es den streckengenauen Übertrag realer Straßenfahrten auf den Prüfstand unter Verwendung realistischer Fahrzeugmodelle [1, 2].

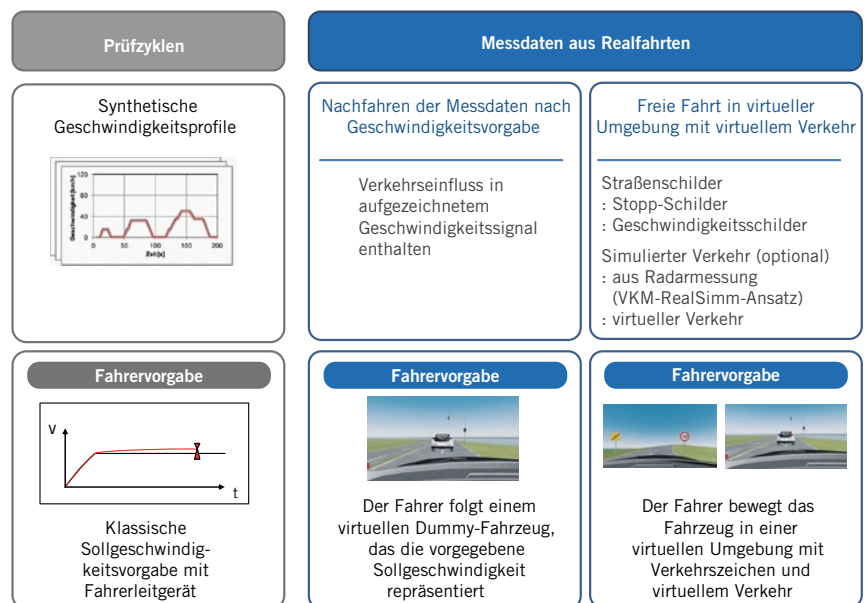
Hierzu werden verschiedene, reale Straßenfahrten mit unterschiedlichen Fahrprofilen erfasst sowie verschiedene Fahrzeuge (verschiedene Antriebskonzepte) und Fahrercharaktere untersucht, um anschließend den Übertrag auf den Rollenprüfstand abzubilden. Durch die zusätzliche Aufnahme der emissions- und kraftstoffverbrauchsrelevanten Messgrößen bei den realen Straßenfahrten wird die Zielsetzung verfolgt, neben dem präzisen Übertrag der Fahrmanöver auch Emissionen und Verbrauch realitätsnah am Prüfstand zu erzeugen und abzubilden.

Mit Blick auf die kommende Richtlinien-Überarbeitung der Euro 6 für Pkw zum Thema Realfahrtabgase (Real Driving Emissions, RDE) [3] zeichnen sich für die Pkw-Hersteller erweiterte Prüfumfänge ab, die mit diesem neuen Ansatz des Übertrags reproduzierbar und im Voraus auf dem Rollenprüfstand bedient werden können.

SIMULATIONSUMGEBUNG AM ROLLENPRÜFSTAND

Zentrales Werkzeug für das manöverbasierte Testen auf dem Prüfstand ist eine Vehicle-in-the-Loop-Simulationsumgebung, die AVL InMotion genannt wird und auf der IPG-CarMaker-Produktfamilie basiert. Diese offene Simulationsumgebung spielt die Schlüsselrolle gemäß des X-in-the-Loop-Frameworks für die Fahrzeug-Fahrer-Fahrbahn-Interaktion. Hier werden die Fahrzeugvarianten, Fahrercharaktere, Fahrbahn- und Verkehrsvariationen über verschiedene Schnittstellen bedient. Dadurch erhält der Testingenieur die Möglichkeit, reale Fahrsituationen auf dem Prüfstand zu untersuchen [4]. ❶ zeigt die erweiterten Möglichkeiten der Fahrervorgabe im Zusammenhang mit der 3-D-Umgebungssimulation am „4×4-Rollenprüfstand Advanced“ gegenüber konventionellen Rollenprüfständen für Prüfzyklen.

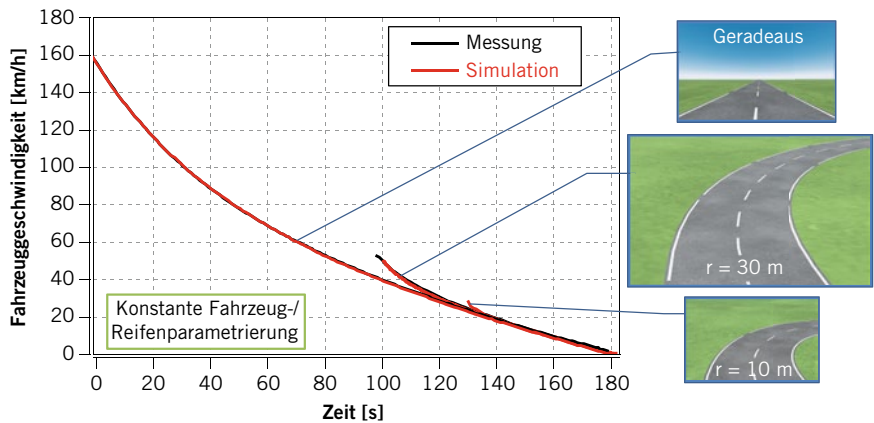
Im Vergleich mit konventionellen Straßensimulationen auf Rollenprüfständen, bei denen eine Ausrollkurve die Grundlage der Simulation bildet, wird bei der erweiterten Straßensimulation mit AVL InMotion ein physikalisches Fahrzeugmodell verwendet, das mit einer virtuellen Umwelt und einem virtuellen oder realen Fahrer interagiert. In Abhängigkeit von der vom realen Fahrzeug an jedem Rad eingebrachten Zugkraft wird die Fahrgeschwindigkeit



❶ Bisherige und neue Fahrmöglichkeiten auf Rollenprüfständen bei Realfahrten

berechnet und am Prüfstand eingestellt. Somit können Kurven und Bergfahrten abgebildet werden, aber auch Variationen der Fahrzeugmasse, Änderungen der Fahrwiderstände (Aerodynamik, Fahrwerk), oder beispielsweise eine Mehrlast durch Anhängerfahrt simuliert werden. Insbesondere bei Kurvenfahrt werden hierbei nicht nur die Differenzdrehzahlen simuliert, sondern auch die zusätzlichen Widerstände durch das Kurvenverhalten des Reifens. ② zeigt den Vergleich zwischen realen und in simulierten Ausrollversuchen (inklusive Ausrollversuche bei Kurvenfahrt).

Die Parametrierung des Fahrzeugmodells erfolgt bei der konventionellen Straßensimulation durch eine einfache Adaptionsprozedur, die auf realen Ausrollwerten (Geradeausfahrt) basiert. Bei der erweiterten Straßensimulation wird das Modell mit physikalischen Parametern (Stirnfläche, c_w -Wert, Rollwiderstand usw.) beschrieben, die zur Laufzeit auch variiert werden können. Für die detaillierte Abbildung muss diese Information zur Verfügung stehen. Da insbesondere am Rollenprüfstand alle Fahrzeugkomponenten real vorhanden sind, sind hier auch sogenannte Universalmodelle einsetzbar. Diese können über einen Fahrzeuggenerator erzeugt werden, der sich auf wesentliche Parameter (Gewicht, Radstand, Fahrzeugtyp etc.) beschränkt.



② Vergleich von gemessenen mit simulierten Ausrollversuchen bei verschiedenen Kurvenradien mit $r = \infty, 10$ und 30 m (Lexus RX 400h)

ßensimulation und das mit der realen Straßenfahrt übereinstimmende Fahrzeugverhalten nachzuweisen.

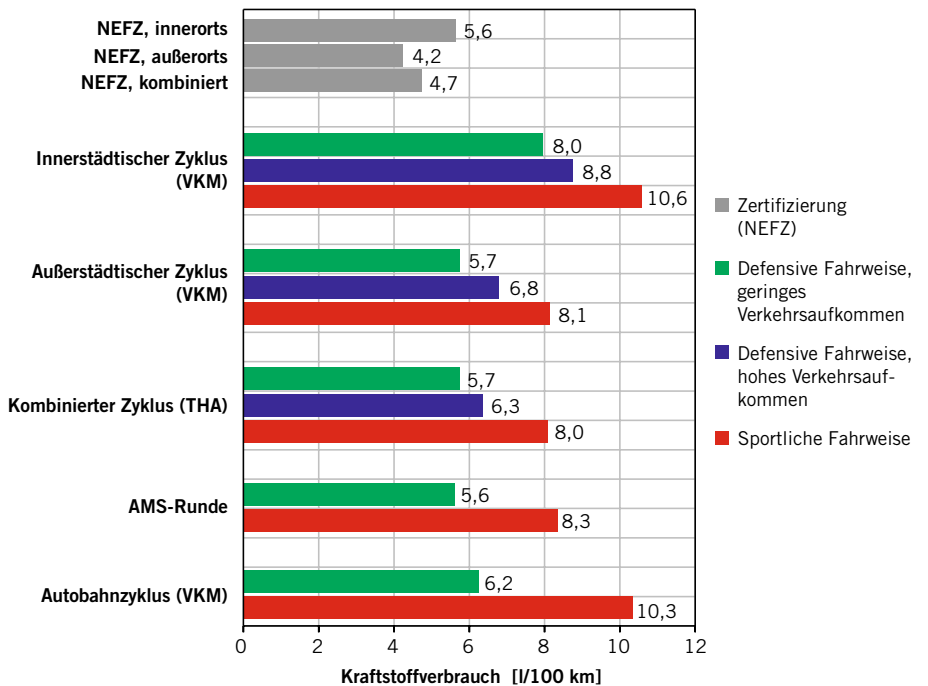
- Zu diesem Zweck wurden drei Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebsstrangkonzepthen ausgewählt:
- : ein Mittelklassewagen Audi A4 Avant mit konventionellem Antriebsstrang und manuellem Schaltgetriebe
 - : ein allradgetriebenes Vollhybridfahrzeug Lexus RX 400h mit rein elektrisch betriebener Hinterachse
 - : das Range-Extender-Fahrzeug Opel Ampera.

Die umfangreiche Ausrüstung mit Messtechnik ermöglicht unter anderem, den Kraftstoffverbrauch und andere wichtige Variablen zu detektieren. Bei den hybriden Antriebssträngen gehören die Leistungsabgabe des Fahrakkumulators und speziell bei dem Fahrzeug Lexus RX 400h alle vier Raddrehzahlen und die Raddrehmomente mit Drehmoment-Messrädern von Kistler zu den erfassten Größen.

Zunächst findet die Vermessung auf der Straße statt, um diese im Anschluss auf den Prüfstand zu übertragen. Die Versuche unterteilen sich in den Betrieb

STRASSENFAHRTEN

Ein wesentliches Merkmal des „4x4-Rollenprüfstands Advanced“ stellt das Abbilden von realen Straßenfahrten mit individuellen Raddrehzahlen und Raddrehmomenten an jedem einzelnen Rad dar. Somit sind zahlreiche Fahrmanöver, die bisher nur auf der realen Straße beziehungsweise auf speziellen Teststrecken und Prüfgeländen durchgeführt werden konnten, erstmalig auf einem Rollenprüfstand darstellbar. Hierzu gehören beispielsweise Kurvenfahrten oder komplexe Fahrmanöver wie eine ABS-Bremung oder ein Anfahrvorgang auf μ -Split. Grundvoraussetzungen für die genannten Prüfstandsfunktionen sind vier einzeln angesteuerte Rollen und die beschriebene Vehicle-in-the-Loop-Simulationsumgebung. Diesen neuen Ansatz, das Fahrzeug realitätsgetreu auf dem Rollenprüfstand zu betreiben, gilt es, mit geeigneten Korrelationsmessungen zu validieren, um die Stra-



③ Gegenüberstellung von Zertifizierungswerten (NEFZ) und realen Kraftstoffverbräuchen in fünf Zyklen (Fahrten im Straßenverkehr, Audi A4 Avant)

im Straßenverkehr und einzelne generische Fahrmanöver auf einer Teststrecke. Bei den Fahrten im Straßenverkehr stand der Energiebedarf der Versuchsfahrzeuge im Fokus; die generischen Fahrmanöver sichern den Nachweis der korrekten Funktion des Prüfstands auf Detailebene ab. Zur Gegenüberstellung dienen unter anderem die Drehzahl- und Drehmomentverläufe aller vier Räder.

FAHRTEN IM STRASSENVERKEHR

Bei den Fahrten im Straßenverkehr stand die Übertragbarkeit auf den Prüfstand und die Spreizung des Kraftstoffverbrauchs im Kundenbetrieb im Fokus, wobei die Spreizung sich hauptsächlich aus Verkehrs- und Fahrereinfluss zusammensetzt. Die Verkehrssituation ist bei Straßenfahrten ein nicht reproduzierbarer Faktor mit deutlichem Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Daher erfolgten Fahrten bei verschiedenen Verkehrsdichten, die den Einfluss der Verkehrssituation belegen. Am Rollenprüfstand kann dieser Unsicherheitsfaktor ausgeschlossen werden, da der virtuelle Verkehr reproduzierbar simuliert wird. Weiterhin soll die Spreizung der Verbrauchskennwerte aus gesetzlichem Prüfzyklus (NEFZ) und Realfahrten bei verschiedenen Fahrerverhalten und damit beim „Kundenverbrauch“ gegenübergestellt werden.

Speziell geschulte Testfahrer waren angewiesen, die Realstrecken sowohl mit einer ruhigen und vorausschauenden („defensiv“) als auch mit einer sportlichen Fahrweise zu absolvieren („sportlich“). Die Fahrten mit defensiver Fahrweise erfolgten sowohl bei niedrigem als auch bei hohem Verkehrsaufkommen. Bei dem Fahrzeug mit Handschaltgetriebe – Audi A4 Avant – vollzog der Fahrer die Gangwechsel entsprechend der Schaltvorgabe des Fahrzeugs oder nutzte bei der sportlichen Fahrweise nahezu das gesamte Drehzahlband des Verbrennungsmotors aus. Bei defensiver Fahrweise lag die maximale Fahrgeschwindigkeit auf Autobahnabschnitten auch bei aufgehobener Geschwindigkeitsbegrenzung bei 130 km/h. Bei sportlicher Fahrweise galt die Zielsetzung, das Fahrzeug möglichst schnell zu bewegen.

Alle Fahrten im Straßenverkehr basieren auf fünf verschiedenen Fahrstrecken/Fahrzyklen mit unterschiedlichen Streckenprofilen. Hierzu zählen ein innerstädtischer Zyklus, ein außerstädti-

scher Zyklus, ein Autobahnzyklus (jeweils vom VKM der TU Darmstadt), ein kombinierter Zyklus des TÜV Hessen Automotive (THA) und die AMS-Runde (von der Zeitschrift Auto, Motor, Sport). ③ zeigt den Einfluss des Fahrerverhaltens und der Verkehrsdichte auf den Kraftstoffverbrauch bei den Fahrten im Straßenverkehr am Beispiel des Audi A4 Avant – im Vergleich mit dem NEFZ.

④ zeigt die Spreizung des Kraftstoffverbrauchs der drei Testfahrzeuge bei den realen Straßenfahrten in Relation zu den typgeprüften Werten im NEFZ. Anzu-merken ist, dass alle Testfahrten mit der zusätzlichen Masse der mitgeführten Messtechnik und eingeschalteten Verbrauchern wie Abblendlicht und Lüftung durchgeführt wurden (Audi A4 Avant: deaktiviertes Start-Stopp-System).

Your life. Our steel.

Da steckt mehr dahinter,
als man vermutet.



Steels for Automotive. Eine nachhaltige und sichere Mobilität braucht intelligente Werkstoffe. Ob Speziallangstähle, hochfeste Stähle oder maßgeschneiderte Stahlsorten – wir bieten die Lösungen, die Automobile umweltfreundlicher, komfortabler und sicherer machen. Unsere Stähle überzeugen durch höchste Qualität und hervorragende Verarbeitbarkeit. Wir sind der kompetente Partner der Automobilindustrie. Mit allen Leistungen aus einer Hand: Stahlproduktion, Verarbeitung, Distribution und Services. Nutzen Sie unser Know-how – weltweit.

SCHMOLZ + BICKENBACH GROUP
Providing special steel solutions



DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE
UGITECH
SWISS STEEL
STEELTEC
SCHMOLZ + BICKENBACH

www.schmolz-bickenbach.com

FAHRZEUG	NEFZ	INNERSTÄDTISCHER ZYKLUS (VKM)		KOMBINIERTER ZYKLUS (THA)		AUTOBAHNZYKLUS (VKM)	
	Kombinierte Angabe (100 %)	Defensiv	Sportlich	Defensiv	Sportlich	Defensiv	Sportlich
	Audi A4 Avant	4,7 [l/100 km]	~ 177 %	~ 220 %	~ 129 %	~ 170 %	~ 131 %
Lexus RX 400h	8,1 [l/100 km]	~ 118 %	–	~ 104 %	~ 133 %	–	–
Opel Ampera (elektr.)	16,9 [kWh/100 km]	–	–	~ 96 %	~ 113 %	–	–

4 Spreizung des Kraftstoff- und Energieverbrauchs bei realen Straßenfahrten

Zur Reproduktion der Versuche auf dem Rollenprüfstand wurden die 3-D-Streckenverläufe mit GPS-Sensorik aufgezeichnet und mit dem Höhenverlauf eines barometrischen Höhensensors kombiniert. Gleichzeitig erfolgte die Aufzeichnung der gesetzlichen Geschwindigkeitsbegrenzungen. Bei Erhebung und Aufbereitung der Messdaten diente der am VKM entwickelte RealSimm-Ansatz als Grundlage [4]. Mithilfe dieser Daten und der entsprechenden Parametrierung wurden die Streckenverläufe am neuen Rollenprüfstand reproduziert. 5 zeigt den THA-Zyklus, real und digitalisiert; 6 zeigt den THA-Zyklus in real und simuliert.

Exemplarisch sind in 7 die Ergebnisse der Wiederholungsmessungen auf dem Prüfstand mit realem Fahrer dargestellt. Sie weisen die hohe Übereinstimmung sowie die Reproduzierbarkeit der Messdaten nach.

GENERISCHE FAHRMANÖVER

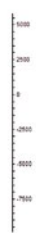
Der zweite Teil der Messkampagne evaluierte die Übertragbarkeit typischer generischer Fahrmanöver auf den Rollenprüfstand. Hierbei sollte ebenfalls das Potenzial des Prüfstands nachgewiesen werden – insbesondere für spezielle Fahrmanöver. Der Versuchsplan enthält Manöver und Fahrbahnvariationen, die am Rollenprüfstand per Simulation nachgebildet werden. Exemplarisch zu nennen sind Voll- und Teillastbeschleunigung, Bremsung und Pedalwertsprung (Tip-in). Variationsparameter sind die Steigung der Fahrbahn (0 und 12 % Steigung), die Fahrbahnvariationen (μ -high, μ -low, μ -Split, Rollenbahnen) und die Fahrzeugmasse, die um rund 200 kg variiert wurde.

Am Beispiel einer Volllastbeschleunigung mit dem Lexus RX 400h, 8, wird der Übertrag der Straßenfahrten (generisches Fahrmanöver) auf den „4 x 4-Rol-

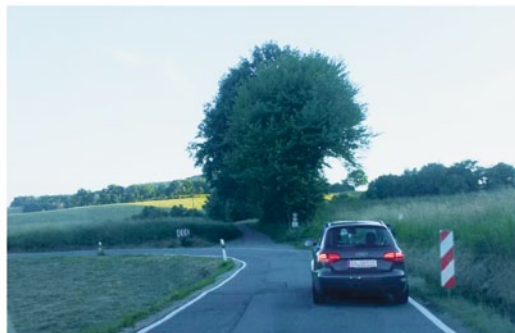
lenprüfstand Advanced“ vorgestellt. Sowohl der zeitliche Verlauf der einzelnen Drehmomente am Rad als auch jener der Raddrehzahlen zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den Straßenmessungen. In 9 sind exemplarisch die Drehmomentverläufe am rechten Vorder- und Hinterrad dargestellt.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

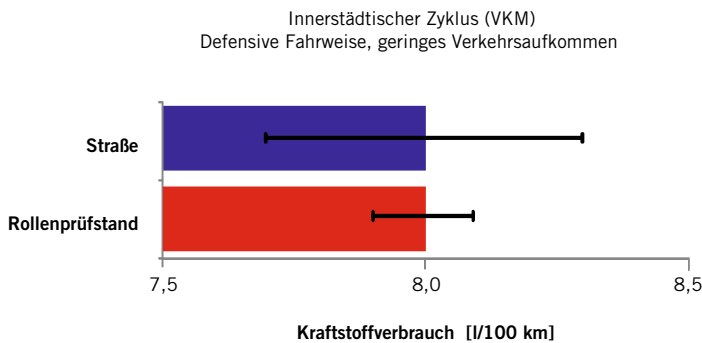
Im Rahmen dieses Beitrags wurde ein ganzheitlicher Systemansatz vorgestellt, der es ermöglicht, Fahrversuche von der Straße auf den Rollenprüfstand zu transferieren. Um komplexe Fahrmanöver für alle Arten von Antriebskonzepten realitätsnah abbilden zu können, kommt hierbei ein Rollenprüfstand mit vier separat angetriebenen Rollen zum Einsatz, der mit einer Simulationsumgebung gekoppelt wird.



5 Realer (links) und digitalisierter (Mitte und rechts) THA-Zyklus



6 Fahrzeug in virtueller (links) und realer (rechts) Umgebung (THA-Zyklus)



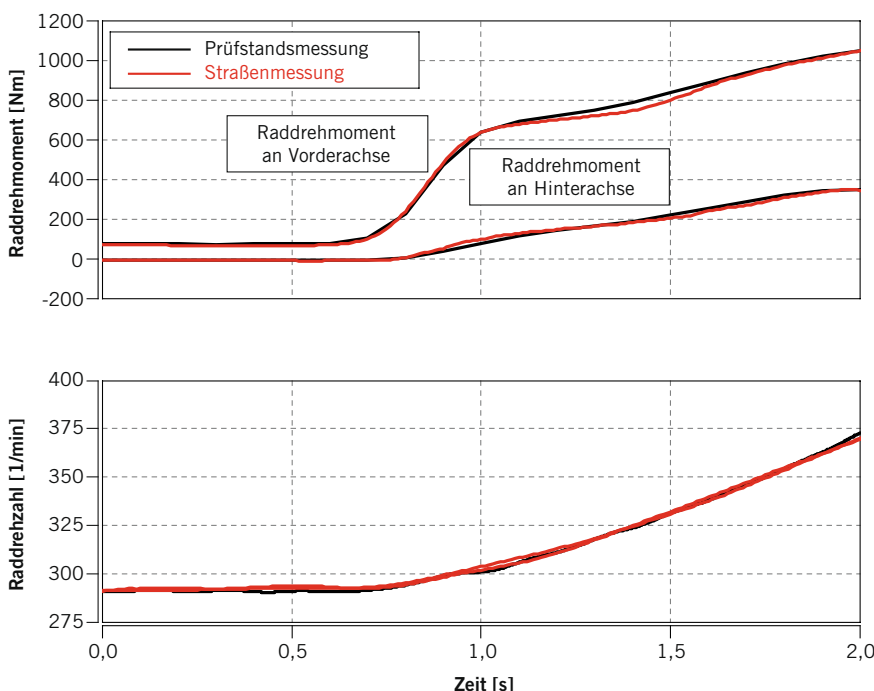
- Fahrprofil entsprechend dem mittlerem Verbrauchswert (F_{Mittel})
- Streubreite der Verbrauchswerte aller Fahrten dieser Konfiguration
- Korrelationsmessung des Fahrprofils F_{Mittel}
- Streubreite der Verbrauchswerte bei Wiederholungsmessungen

7 Vergleich der Korrelationsmessungen (Audi A4 Avant)

Diese Umgebung ermöglicht unter anderem das Abbilden von Kurvenfahrten, Bergauf- und Bergabfahrten, radindividuellem Schlupf sowie die Analyse von Torque-Vectoring-Systemen am Rollenprüfstand. Dabei werden kraftstoffverbrauchsdominierende Einflussparameter wie beispielsweise der Verkehrsfluss, aber auch Fahrzeugparameter wie Fahrzeugmasse oder Luftwiderstand modellbasiert variiert, um somit Kraftstoffverbrauch, Abgasemissionen oder den Energiefluss (Elektromotor und Batterie) und dessen Auslegungsstrategie systematisch zu untersuchen. Auch der Einfluss verschiedener Fahrercharakteristika ist abbildbar.

Neben standardisierten Homologations- und Zertifizierungsaufgaben eignet sich diese umfassende ViL-Entwicklungsplattform für die Bestimmung von Realfahrtgasen (Real Driving Emissions, RDE) und Realverbrauch auf beliebigen synthetischen oder aus Fahrversuchen übertragenen Strecken und stellt damit auch eine ideale Ergänzung zu den PEMS-Messungen im Straßenverkehr dar [3]. Weitere Anwendungsfälle sind Entwicklungs- und Optimierungsaufgaben am Gesamtfahrzeug wie beispielsweise die Triebstrangapplikation-, Funktions- und Betriebsstrategieoptimierung moderner konventioneller und elektrifizierter Triebstränge.

Somit können Aufgaben der Fahrzeugentwickler (Applikation) von der Straße auf den Prüfstand verlegt werden. Die Reproduzierbarkeit der einzelnen Versuche sowie die Flexibilität, verschiedene reale Fahrstrecken unmittelbar nacheinander zu testen, stellen hier einen besonderen Vorteil dar. Darüber hinaus lässt sich das Verhalten verschiedener Fahrzeugtypen (Benchmarking) unter identischen Fahrbedingungen auf beliebigen Fahrstrecken am „4×4-Rollenprüfstand Advanced“ reproduzierbar abbilden. Dies war bisher auf der Straße stets den Schwankungen durch Umgebungs- und Verkehrsbedingungen unterworfen.



8 Vergleich zwischen Prüfstandsmessung und Straßenmessung (Teststrecke) bezüglich der Vollastbeschleunigung (Lexus RX 400h, Messwerte des rechten Vorder- und Hinterrads)

LITERATURHINWEISE

- [1] www.tuev-hessen.de/tuz
- [2] Düser, T.; Schmidt, C.; Schmidt, U.; Pfister, F.: Rollenprüfstände für Fahrzeug- und Antriebskonzepte von morgen. In: ATZ 114 (2012), Nr. 4, S. 312 – 317
- [3] Steininger, N.: Finalising Euro 6 and Reducing CO₂ Emissions of Light Duty Vehicles. 3. VDI-Fachkonferenz Abgasnachbehandlungssysteme 2012, Stuttgart, 5. und 6. Dezember 2012
- [4] Kluij, M.; Bier, M.; Weickgenannt, P.; Beidl, C.: Einsatz dreidimensionaler Umgebungssimulation in der Entwicklung von Hybridantrieben. ATZlive-Konferenz VPC Virtual Powertrain Creation, Esslingen, 25. und 26. September 2012
- [5] Pfister, F.; Schick, B.: Die Zukunft hat einen Sensor: Location Awareness meets Powertrain Controls. 4. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 8. und 9. November 2011

DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.ATZonline.de

READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 order your test issue now:
springervieweg-service@springer.com