

# Model-based Validation Applied to Off-Highway Vehicles

Christian Schyr<sup>1</sup>, Benjamin Reiß<sup>1</sup>, Frank C. Otto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IPG Automotive GmbH, Bannwaldallee 60, 76185 Karlsruhe

<sup>2</sup>Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Gotthard-Franz-Strasse 8, 76131 Karlsruhe

**Abstract.** Die Entwicklung von automatisierten und energieeffizienten mobilen Maschinen stellt auch neue Anforderungen an die Erprobungsmethoden und die dabei verwendeten Werkzeuge. Der Beitrag beschreibt die Anwendung der modellbasierten Validierung mittels einer durchgängig eingesetzten Integrations- und Testplattform im gesamten Entwicklungsprozeß. Ziel der Methode sind präzise Aussagen über die Erfüllung der Ziele bzw. Spezifikationen auf Fahrzeugebene bereits in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses. Die Validierung dieser globalen Ziele erfolgt durch virtuelle manöverbasierte Versuchsfahrten in derselben Weise wie im realen Feldversuch. Dabei kommen je nach Verfügbarkeit detaillierte Simulationsmodelle aus unterschiedlichen Modellierungsumgebungen sowie reale Fahrzeugkomponenten und -systeme auf Leistungsprüfständen zum Einsatz. Der Einsatz der Methode wird am Beispiel eines Radladers veranschaulicht.

## 1 Einleitung

Die Erprobung komplexer mechatronischer Funktionen zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Automatisierung von mobilen Arbeitsmaschinen stellt neue Anforderungen an die eingesetzten Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung. Aufgrund des hohen Zeit- und Kostenaufwands für die Erprobung von kompletten Prototypen in realen Feldversuchen ist die Methode der modellbasierten Validierung eine interessante Alternative bzw. Ergänzung [1,2].

Der Beitrag beschreibt den durchgängigen und effizienten Einsatz von Simulationsmodellen in einer Integrations- und Testplattform im gesamten Entwicklungsprozeß von mobilen Arbeitsmaschinen, von der modellbasierten Spezifikation bis hin zur Umgebungssimulation im realen Prototypfahrzeug. Kern der Methode ist die virtuelle Durchführung von manöverbasierten Tests in derselben Weise wie im realen Feldversuch. Eine Kombination aus interaktiver Manöversteuerung, einem intelligentem Fahrermodell und einem Umgebungsmodell ermöglicht die realistische und reproduzierbare Rekonstruktion auch von anspruchsvollen „Use Cases“ in der Manöversprache der Testingenieure. Ziel ist die konsistente und präzise Bewertung des aktuellen Entwicklungsstandes im Vergleich zu den gesetzten Zielen und Spezifikationen in allen Phasen des Produktentwicklungsprozesses.

### 1.1 Beschreibung der Methode

Im herkömmlichen Entwicklungsprozeß mechatronischer Systeme werden die Ziele bzw. Spezifikationen von Fahrzeug- auf System- und weiter auf Subsystem und Kom-

ponentenebene herunter gebrochen und eine lokale Validierung auf diesen Ebenen in der Integrationsphase durchgeführt. Dies ist in Abb. 1 im bekannten V-Modell nach VDI 2206 dargestellt [3]. Ein Beispiel für lokale Validierung auf Subsystemebene ist die Vermessung des Momenten- und Verbrauchskennfeldes auf einem Verbrennungsmotorprüfstand und Vergleich mit einer Spezifikation.

Die Optimierung und experimentelle Validierung der globalen Fahrzeugeigenschaften erfolgt erst spät in der Systemintegrationsphase auf der rechten Seite des V-Modells, typischerweise auf Fahrzeugebene im realen Feldversuch. Ein Beispiel für globale Validierung ist die Ermittlung der Arbeitsleistung, des dazu nötigen Kraftstoffverbrauches und der Emissionen im Ladezyklus eines Radladers.

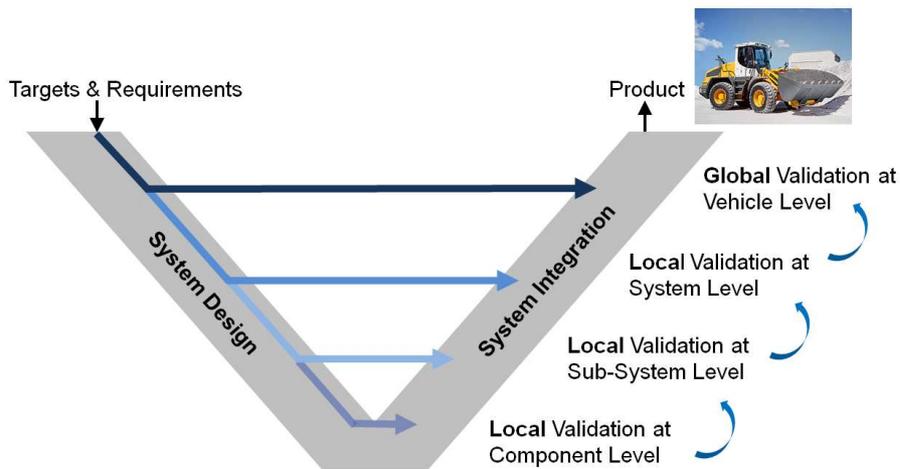


Abb. 1. Herkömmliche Validierung im Entwicklungsprozeß nach VDI 2206

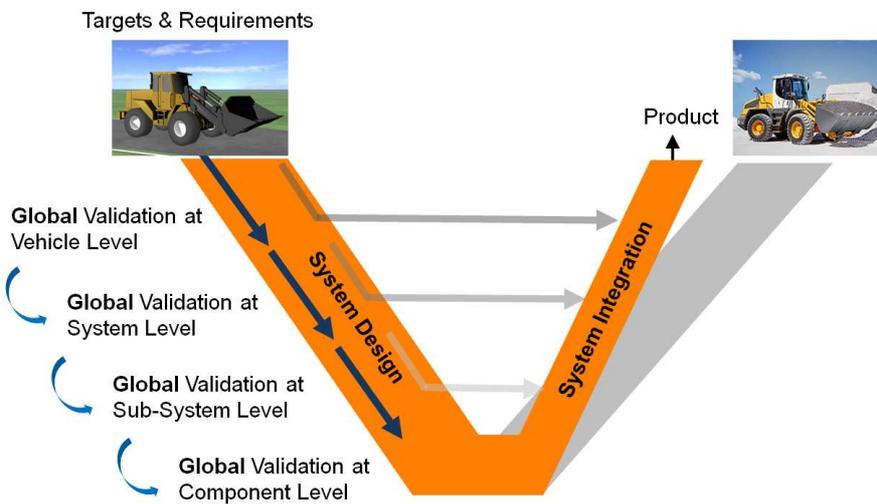


Abb. 2. Erweiterung zur modellbasierten Validierung im Entwicklungsprozeß

Ziel der in Abb. 2 dargestellten Methode der modellbasierten Validierung ist die effiziente Optimierung und Bewertung der globalen Fahrzeugeigenschaften gegenüber den Spezifikationen bereits in frühen Entwicklungsphasen. Dies erfolgt durch den durchgängigen Einsatz eines virtuellen Fahrzeugs, eines detaillierten Manöverkatalogs sowie den zugehörigen Bewertungskriterien auf System-, Subsystem- und Komponentenebene in den frühen Entwurfs- und Optimierungsphase auf der linken Seite des V-Modells.

Vorteil ist die rasche und effiziente Validierung der globalen Fahrzeugeigenschaften nach Entwurfsänderungen bereits ohne Verfügbarkeit eines realen Versuchsfahrzeugs. Dabei steht die integrale Bewertung von Funktionen und Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug, Fahrer, Sensoren, Straße bzw. Gelände, Verkehr und Umgebung im Vordergrund. Besonders geeignet ist die Methode für eine plattformbasierte Fahrzeugarchitektur, wo die Validierung einer Vielzahl an Fahrzeugkonfigurationen im realen Feldversuch schwierig bis unmöglich ist. Für den erfolgreichen Einsatzes der Methode sind allerdings folgende Voraussetzungen erforderlich:

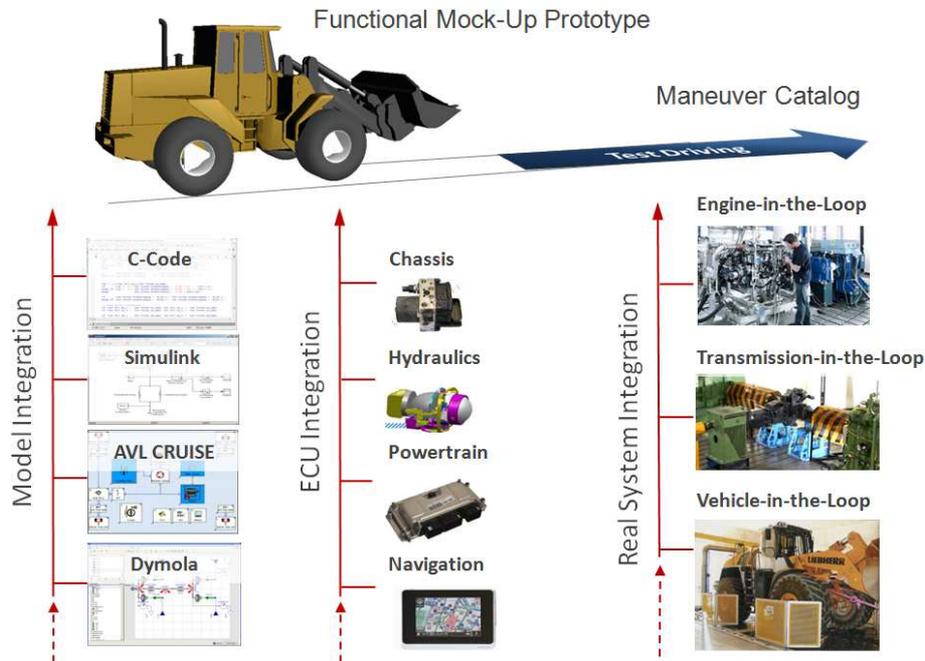
- Einheitliche Beschreibung der globalen Fahrzeugeigenschaften durch Manöverkataloge mit zugehörigen Bewertungskriterien für die Fahr- bzw. Arbeitsleistung, Energieeffizienz, Fahrbarkeit bzw. Komfort, Sicherheitsfunktionen, etc.
- Verfügbarkeit der Subsysteme und Komponenten entweder als detaillierte Simulationsmodelle (Functional Mock-Up) oder als reale Prototypen auf Leistungsprüfständen (X-in-the-Loop).
- Hohe Qualität der vorgelagerten Prozesse im Produktdatenmanagement zur Gewinnung von Modellparametern und nachgelagerten Prozesse zur Ergebnisdatenverwaltung.

## 1.2 Umsetzung der Methode

Zur praktischen Umsetzung der modellbasierten Validierung werden folgenden Anforderungen an die Integrations- und Testplattform gestellt:

- Durchgängiger Einsatz der Plattform von Software-in-the-Loop über Hardware-in-the-Loop bis hin zum realen Prototypfahrzeug.
- Effiziente Integration von Simulationsmodellen und Steuergerätefunktionen aus unterschiedlichen Domänen und Modellumgebungen.
- Effiziente Anbindung an Leistungsprüfstände für Fahrzeugsysteme und Komponenten.
- Realitätsnahe Rekonstruktion von realen „Use Cases“ durch eine leistungsfähige Manöversteuerung.
- Hohe Produktivität durch Performance und Useability wie interaktive Manöversteuerung, intuitiv bedienbare graphische Benutzerschnittstellen und eine effiziente Testautomatisierung.
- Aussagekräftige Visualisierungs- und Analysewerkzeuge.
- Flexible Anbindung an firmenspezifische Datenmanagementsysteme .
- Investitionssicherheit durch Einsatz von Softwarestandards und COTS-Komponenten.

## 2 Offene Integrations- und Testplattform



**Abb. 3.** Schnittstellen der Integrations- und Testplattform IPG TruckMaker

Die effiziente Konfiguration eines Functional Mock-Up des zu validierenden Fahrzeuges in den einzelnen Entwicklungsphasen erfordert definierte Schnittstellen zu unterschiedlichen Modellierungsumgebungen wie Simulink, Dymola, AVL Cruise oder AMESim (Abb. 3). Parallel dazu sind Schnittstellen zu realen Komponenten, sowohl als Steuergeräte und als physikalische Prototypen auf Leistungsprüfständen verfügbar [4,5]. Die Schnittstellen werden über eine standardisierte C-Interfacestruktur sowie ein Functional Mock-Up Interface (FMI) für Modelica zur Verfügung gestellt [6].

Eine Besonderheit der Plattform ist die Möglichkeit, über einen Modellmanager die einzelnen Subsysteme wie Antriebsstrang, Lenkung, Bremssystem und Aufbauten unabhängig voneinander aus unterschiedlichen Versionen der Modellierungsumgebungen zu integrieren. Damit entfällt die Notwendigkeit zur Festlegung einer einheitlichen Softwareversion von z.B. Simulink in einem Entwicklungsprojekt. Einzige Voraussetzung ist ein Codeexport aus der jeweiligen Modellierungsumgebung. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes ist die individuelle Anpassung des Integrationsverfahrens und der Schrittweite für die einzelnen Modelle der Subsysteme oder der Ersatz des Modells durch einen realen Prototyp am Leistungsprüfstand. In Abb. 4 ist die Konfiguration des Functional Mock-Up für das Subsystem Motor mit Modell (links) und Prüfstandsschnittstelle (rechts) dargestellt.

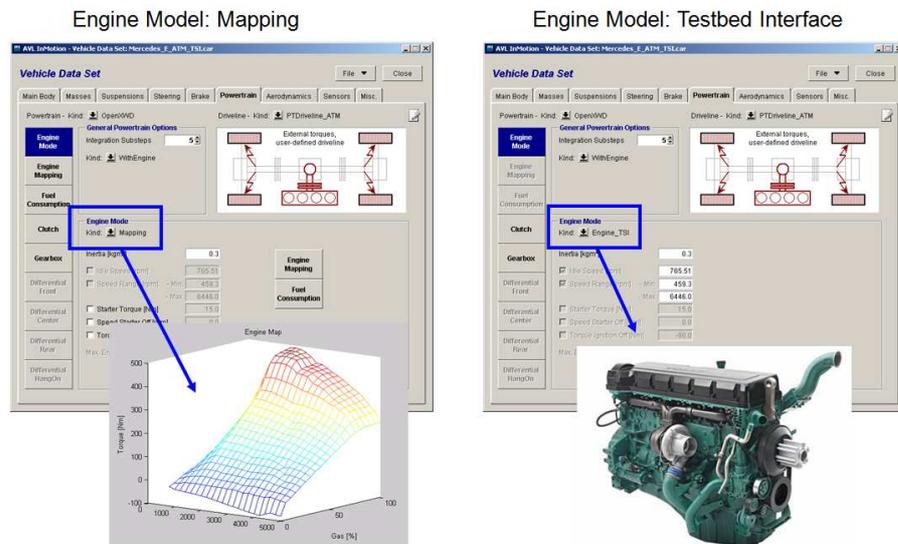


Abb. 4. Modellmanager am Beispiel Subsystem Verbrennungsmotor

Zur Durchführung von komplexen virtuellen Fahrversuchen sind neben dem vollständigen und präzisen Fahrzeugmodell auch eine Manöversteuerung, Fahrermodell, Straßen- bzw. Geländemodell sowie Verkehrsmodell in die Ausführungsumgebung der Plattform eingebettet (Abb. 5). Dienste zur Netzwerkkommunikation, Steuergeräteapplikation und -diagnose sowie Online-Visualisierung ermöglichen einen effizienten Betrieb in allen Entwicklungsphasen.

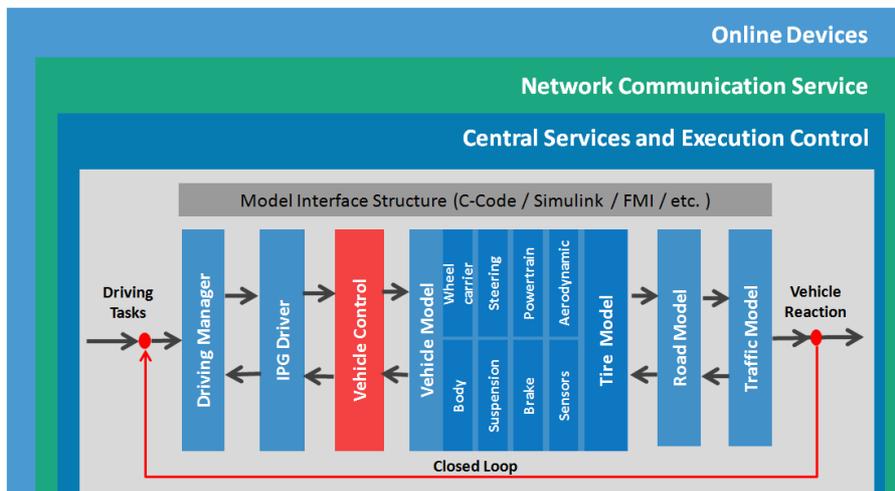


Abb. 5. Architektur der Integrations- und Testplattform

### 3 Beispiel Radlader

Die Anwendung der modellbasierten Validierung in unterschiedlichen Entwicklungsphasen soll am Beispiel eines Radladers veranschaulicht werden.

In der Spezifikations- bzw. Konzeptphase der Entwicklung werden alle Teilsysteme bzw. Steuergerätefunktionen virtuell abgebildet. Dies erfolgt durch Aufbau des Gesamtfahrzeugs in einer definierten Konfiguration aus den einzelnen Teilmodellen. Über eine interaktive Benutzeroberfläche und einen Modellmanager werden entweder vorhandene Modelle aus der Bibliothek von IPG TruckMaker oder projektspezifische Modelle aus anderen Modellierungsumgebungen zur Laufzeit der Simulation integriert (Abb. 6). Im Beispiel sind die Subsysteme Antriebsstrang und Hebewerk in Dymola modelliert und über Codeexport in die Testplattform integriert, die Subsysteme Chassis, Fahrwerk, Lenkung und Bremssystem aus Standardmodellen bedatet. Das Reifenmodell ist projektspezifisch mit einem terramechanischen Ansatz als „Earth Moving Tire“ direkt in ANSI-C programmiert. Alle Steuergerätefunktionen sind in Simulink programmiert und ebenfalls über Codeexport integriert. Optional können ein Anhänger und Zusatzlasten in der Versuchsdefinition festgelegt werden.

Die Beschreibung des virtuellen Versuchsgeländes erfolgt über einen segmentbasierte Ansatz mittels Curved Regular Grid (CRG). Dabei wird entlang einer Referenztrajektorie das hochaufgelöste Oberflächenprofil in einem orthogonalen Raster definiert und in einem effizienten Datenformat abgelegt [7]. Zusätzlich werden die Oberflächeneigenschaften des Bodens sowie ortsgebundene Anweisungen für den Fahrer darin abgelegt.

Anschließend werden in der Manöverbeschreibung die Vorgaben für das Fahrermodell in Längs- und Querdynamik getroffen. Dabei können Closed Loop und Open Loop Manöver beliebig kombiniert werden. Zur Weiterschaltung in den einzelnen Manöverschritten kann auf alle vorhandenen Signale in der Testplattform zugegriffen und diese logisch verknüpft werden.

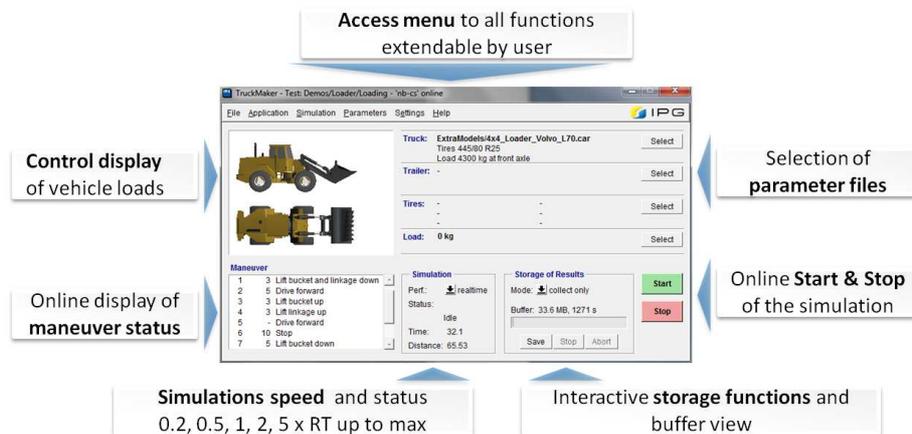
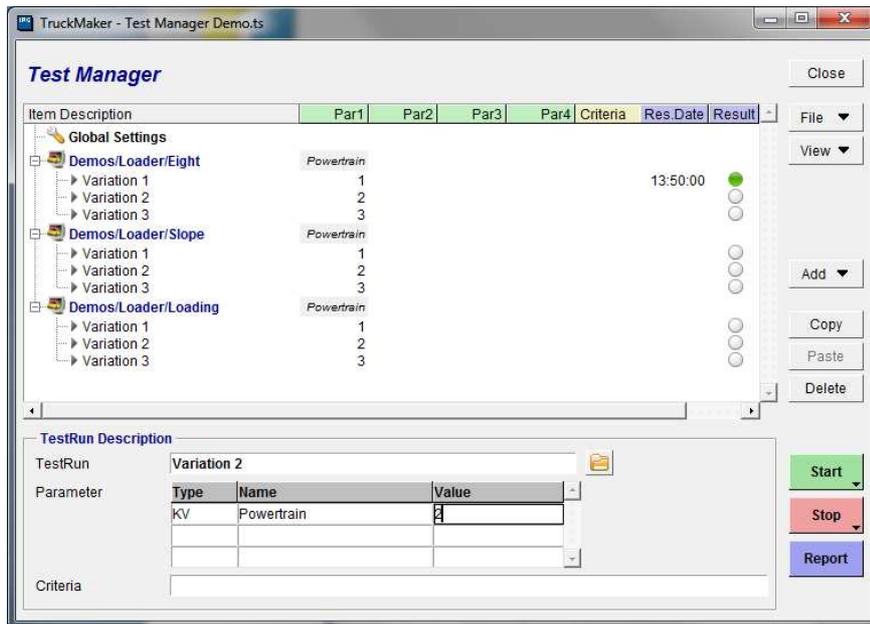


Abb. 6. Graphische Benutzeroberfläche der Testplattform



**Abb. 7.** Beispiel für Testkatalog

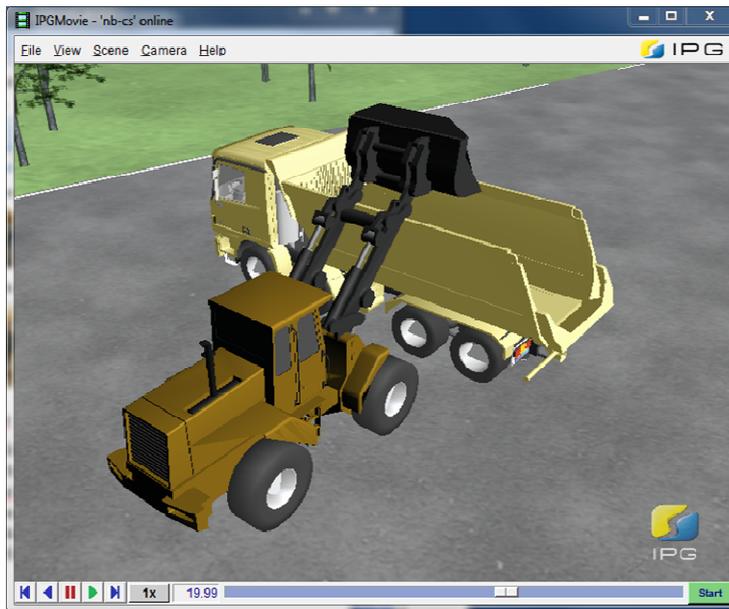
Die einzelnen Manöver werden zu einem Testkatalog zusammengefaßt und mit automatisiert ausgewerteten Kriterien verknüpft (Abb. 7). Im Testkatalog besteht die Möglichkeit, einzelne Modellparameter oder ganze Parametersätze als Variationsmatrix zu definieren. Damit kann die Testbeschreibung und Testauswertung wie im realen Versuch fahrzeugunabhängig erfolgen und vollautomatisch durchgeführt werden.

Typische Beispiele für Testmanöver bei Radladern sind:

- Ladezyklus (Abb 8).
- Schiebebetrieb
- Anhängerbetrieb
- Acht Fahren (Verspannungen im Antriebsstrang)
- Fahren auf Geländestrecke mit starker Längs- und Querneigung
- Fahren in „matschigen“ Boden (Low-mu und mu-Split)
- Fahren mit hohem Schlupf und veränderlicher Reifendruck
- Fahren über Bodenunebenheiten
- Umkippen bei hochgehobener Schaufel und maximalen Lenkwinkel

Typische globale Kriterien zur Auswertung der einzelnen Fahrmanöver sind:

- Fahr- bzw. Arbeitsleistung
- Kraftstoffverbrauch und Emissionen
- Fahrbarkeit
- Sicherheitsreserve



**Abb. 8.** Online Visualisierung des virtuellen Prototypen am Beispiel Y-Zyklus

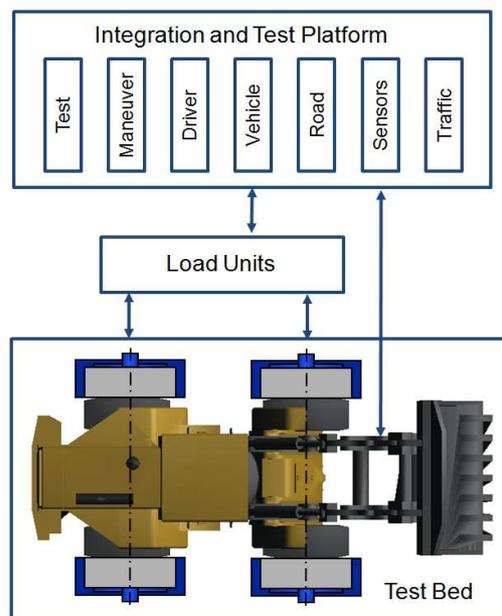
Nach erfolgter Konzeptfestlegung, Komponentenauswahl und Verfügbarkeit von realen Prototypen der mechatronischen Teilsysteme wie Antriebsmotor, Getriebe oder Lenksystem, kann die modellbasierte Validierung auf Leistungsprüfständen weitergeführt werden. Dazu wird die Testplattform mit den darin eingebetteten Modellen in einer Echtzeitkonfiguration betrieben. Als einzige Änderung im Projekt wird das Modell des relevanten virtuellen Teilsystems durch eine Schnittstelle zum Leistungsprüfstand ersetzt. Im vorliegenden Beispiel ist dies ein Allrad-Rollenprüfstand (Abb. 9).



**Abb. 9.** Realer Prototyp am Allrad-Rollenprüfstand des KIT

Die modellbasierte Validierung am Allrad-Rollenprüfstand bietet nun die Möglichkeit, die globalen Fahrzeugeigenschaften mit dem im Versuchsträger verbauten realen Antriebsstrang sowie der Arbeitsantriebe in Kombination mit dem aus der Designphase übernommenen Modellen und Testkatalogen sehr effizient abprüfen zu können. Am Prüfstand können nun auch sicherheitskritische Zustände und die Reaktion der Steuergeräte darauf durch entsprechende Fahr- und Arbeitsmanöver realitätsnahe und reproduzierbar dargestellt werden. Optional werden Module zur Einbringung von elektrischen Fehlern in Sensorleitungen von Steuergeräten verkabelt (Fail-Safe-Tester) und deren Ansteuerung in den Manöverablauf integriert, z.B. zum Test von Diagnose- und Fallbackfunktionen bei Ausfall von Raddrehzahlsensoren.

Eine Besonderheit der Test- und Integrationsplattform IPG TruckMaker ist dabei die Simulation von komplexer Sensorik wie Ultraschall, Radar, Satellitennavigation [8] und kamerabasierten Systemen [9] und deren Einspeisung in die jeweiligen Steuergeräte am Prüfstand (Abb. 10). Die virtuellen Sensoren erfassen die im Verkehrs- und Umgebungsmodell definierten Objekte und ermöglichen damit die Validierung von vernetzten Sicherheits- und Automatisierungsfunktionen unter reproduzierbaren Bedingungen am Rollenprüfstand.



**Abb. 10.** Sensor- und Verkehrssimulation am Leistungsprüfstand

## 4 Zusammenfassung

Die Methode der modellbasierten Validierung und deren Anwendung mittels einer durchgängig eingesetzten Integrations- und Testplattform ermöglicht die effiziente und präzise Analyse der globalen Fahrzeugeigenschaften in allen Phasen des Entwicklungsprozesses. Voraussetzung dazu ist allerdings ein robuster und schneller Prozeß zur Modellerstellung und -bedatung aus unterschiedlichen Modellumgebungen, sowie deren effiziente und projektübergreifende Verwaltung mittels Produktdaten-Managementsystemen. Weiters müssen alle für die globalen Fahrzeugeigenschaften relevanten Steuergerätefunktionen entweder als ausführbarer Code (z.B. als AUTOSAR Komponente) oder in einem realem Steuergerät zur Verfügung stehen.

Die Modellstruktur der einzelnen Teilsysteme des Fahrzeugs in der Testplattform entspricht den späteren realen Prototypen und ermöglicht dadurch den einfachen Austausch von Modell gegen Realteil am Prüfstand. Dies erfolgt dann, wenn der Detaillierungsgrad des Modells nicht mehr ausreicht und ein Prototyp zur Verfügung steht. Die Testbeschreibung durch Manöverkataloge mit verknüpften Kriterien orientiert sich am realen Feldversuch. Damit können die globalen Fahrzeugeigenschaften in allen Entwicklungsphasen konsistent überprüft und frühzeitig eine optimale Auslegung und Integration sichergestellt werden.

## 5 Literatur

1. Albers, A.; Schyr, C.: Modellbasierte Produktvalidierung mittels Integration von funktionalen und physikalischen Beschreibungen. Tagungsband 4. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme (Paderborn 2006), HNI-Verlagsschriftenreihe Band 189
2. Stempfer, G.; Schyr, C.; Kluin, M.; Kremer, B.: Einsatz von Simulation bei der Entwicklung von AUTOSAR-konformen Steuergeräten für Traktoren. ATZoffhighway (März 2009), S. 48-57
3. VDI-Richtlinie 2206 (Juni 2004). Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.
4. Schyr, C.; Jakubek, S.; Stempfer, G.: A New Method of Coupling HiL-Simulation and Engine Testing Based on AUTOSAR-Compliant Control Units. SAE Technical Paper 2009-01-1521. SAE 2009 World Congress (Detroit 2009).
5. Pfister, F; Schyr, C.; LeRhun, F.: Effizientes Testen für mehr Energieeffizienz – Der Rollenprüfstand als mechatronische Entwicklungsplattform. Automobiltechnische Zeitschrift 111 (2009), Nr. 11, S. 847-852
6. Ziegler, S.; Höpler, R.: Extending the IPG CarMaker by FMI Compliant Units. 8th International Modelica Conference (Dresden 2011).
7. Schick, B.; Gimmler, H.; Rauh, J.; Witschass, S.: 3D-Track - Give the Simulation the Chance for a Better Work! Mobile, High-resolution Topology and Roughness Measuring of Road Surfaces to Create 3D Track Models. Proceedings of the FISITA World Automotive Congress (Yokohama 2006).
8. Butz, T.; Wurster, U.; Trommer, G.; Wankerl, M.: Fahrdynamiksimulation: Space-Segment-Model zum Bewerten von GPS/INS Fusionsarchitekturen. 12. Internationales Stuttgarter Symposium "Automobil und Motorentechnik" (Stuttgart 2012).  
Schmidt, S.; Schick, B.: Evaluation of Video Based Driver Assistance Systems with Sensor Data Fusion by Using Virtual Test Driving. 5. Fachtagung AUTOREG 2011 Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren (Baden-Baden 2011)