

# Validierung von Fahrzeug-Antriebssystemen mit hochdynamischen Prüfständen

---

Albert Albers, Christian Stier, Adam Babik, Martin Geier

## Abstract

The current powertrain system development is affected by a high fraction of virtual methods especially in the validation of product properties such as functionality or the survey of comfort characteristics. Particularly the rating of comfort affecting phenomena in the power train system turns out as a huge challenge.

Numerous measures for efficiency improvement in power trains, such as downsizing of combustion engines or efficiency-optimized transmission systems, lead to increased vibration excitation and vibration sensitivity, regarding for example gear rattle or clutch judder. At the same time a challenge exists in the assessment of such interdependencies in the powertrain during the early phases of product development.

Based on these backgrounds a new test bench for clutch system testing, suited with two high dynamic electric engines, is introduced. The test bench allows it for example to perform investigations to evaluate the potential of state-of-the art vibration damping systems for combustion engines with increased vibration excitation or to investigate the decrease of damping in drive systems concerning judder and jerk phenomena.

## Kurzfassung

Die heutige Entwicklung von Antriebssystemen ist geprägt von einem hohen Anteil virtueller Methoden gerade bei der Validierung von Produkteigenschaften, z.B. der Gewährleistung von Funktionseigenschaften oder der Absicherung von Komforteigenschaften. Besonders die Beurteilung komfortbeeinträchtigender Phänomene im Antriebssystem stellt dabei eine große Herausforderung dar.

Zahlreiche Maßnahmen zur Effizienzsteigerung in Antriebssystemen, wie Downsizing der Verbrennungsmotoren oder wirkungsgradoptimierte Getriebe, führen zu steigender Schwingungsanregung einerseits und zunehmender Schwingungsempfindlichkeit, z.B. hinsichtlich Getrieberasseln oder Kupplungsrupfen, andererseits. Gleichzeitig besteht die Herausforderung solche Wechselwirkungen im Antriebssystem möglichst früh beurteilen zu können.

Vor diesem Hintergrund wird in dem Beitrag ein neuartiger hochdynamischer Zwei-Motoren-Prüfstand für Kupplungssysteme vorgestellt. Dieser Prüfstand erlaubt es beispielsweise, das Potential von verfügbaren Schwingungsdämpfersystemen hinsichtlich steigender verbrennungsmotorischer Schwingungsanregung zu bewerten

oder den Einfluss sinkender Schwingungsdämpfung im Antriebsstrang auf die Auswirkung von Rumpf- oder Ruckelschwingungen zu ermitteln.

## **1. Zielkonflikte in der Antriebsstrangentwicklung**

Zahlreiche Anforderungen an die Entwicklung von modernen Antriebssystemen stehen in direktem Bezug zur Gewährleistung einer ressourcenschonenden Mobilität. Übergeordnete Trends in der Entwicklung von Antriebssystemen - sowohl die Wirkungsgradoptimierung konventioneller Antriebe als auch der Entwicklung neuartiger, insbesondere elektrifizierter Antriebskonzepte - bringen typische Herausforderungen mit sich.

### **1.1 Innovative Getriebelösungen**

Doppelkupplungsgetriebe (DKG) werden mit der Zielsetzung entwickelt, einen möglichst hohen Wirkungsgrad des Antriebssystems - insbesondere des Getriebes - bei gleichzeitig gesteigerter Fahrdynamik zu erzielen.

DKG werden mit trocken- oder nasslaufenden Kupplungen ausgeführt. Trockenlaufende Systeme haben prinzipiell Wirkungsgradvorteile aufgrund des geringeren Schleppmoments bei offener Kupplung und dem Wegfall von Ölpumpen, während sich mit nasslaufenden Systemen höhere Leistungsdichten erreichen lassen. Daraus ergeben sich unterschiedliche Entwicklungsziele: bei nasslaufenden Doppelkupplungen steht die Minimierung des Schleppmoments im Vordergrund, beispielsweise durch Optimierung des Trennverhaltens der jeweils offenen Kupplung mittels gezielter Gestaltung der Belagslamellen [1]. Bei trockenlaufenden Doppelkupplungen ergeben sich Herausforderungen aus dem begrenzten axialen Bauraum für das Kupplungssystem [2], der im Vergleich zu konventionellen Getriebelösungen meist unverändert ist. Mit der Integration der einzelnen Kupplungsfunktionen wie Aktuation, Verschleißnachstellung und Torsionsschwingungsdämpfung steigen dadurch auch die Anforderungen an die thermische Belastbarkeit der Komponenten. Da im Betrieb von Doppelkupplungsgetrieben häufigere Schaltung auftreten und die Kupplungen zur Komfortoptimierung oft in Teilschlupfregelung betrieben werden, steigen Verschleiß und thermische Belastung im Vergleich zu konventionellen Kupplungsanwendungen zusätzlich an [3].

### **1.2 Elektrifizierung bzw. Hybridisierung von Antriebssystemen**

In Fahrzeugkonzepten, die wahlweise mit rein verbrennungsmotorischem Antrieb oder mit Hybrid-Antrieb ausgestattet werden sollen, führt das Bauraum-Konzept ebenfalls zu hohen Anforderungen bei der Systemintegration von Elektromotor, Trenn- und Anfahrkupplungen sowie Schwingungsdämpfer. Zusätzlich variieren die Anforderungen z.B. an das Kupplungssystem sehr stark in Abhängigkeit der jeweiligen Hybridtopologie und Betriebsstrategie. Beispielsweise müssen Trennkupplungen, die zum Umschalten verschiedener Betriebsmodi genutzt werden, möglichst schleppmomentfrei arbeiten [4]. Kupplungen, die zum Anschleppen des Verbrennungsmotors im Fahrbetrieb verwendet werden, unterliegen Anforderungen hinsicht-

lich des Wiederstartkomforts. Bei Kupplungen, die mehrere Funktionen – z.B. Anfahen mit Verbrennungsmotor, Abkopplung von Antrieben oder Anschleppen des Verbrennungsmotors – in sich vereinen, ergeben sich daraus oftmals Zielkonflikte in der Systemauslegung.

### **1.3 Wirkungsgradoptimierung verbrennungsmotorischer Antriebe**

Der Verbrennungsmotor (VKM) als Hauptantriebsquelle eines Kraftfahrzeuges wird auf absehbarer Zeit nicht vollständig durch neue Antriebstechnologien (z.B. Batterieelektrofahrzeuge) ersetzt werden können [8]. Zur Wirkungsgradverbesserung des konventionellen Fahrzeugantriebsstrangs werden aktuell wesentliche Anstrengungen unternommen, wie beispielsweise Reibleistungsreduzierung oder die Elektrifizierung von Triebstrangkomponenten, die indirekt auch dazu beitragen den Verbrennungsmotor in seinem effektiven Wirkungsgrad zu steigern. Als Beispiele sollen hier elektrifizierte Nebenaggregate, elektro-mechanische Ventilsteuerungssysteme oder in der Reibleistung reduzierte Kolbentrieb-Systeme genannt werden. Mit Hilfe intelligenter Thermomanagement-Systeme lassen sich verkürzte Aufheizphasen an der VKM realisieren, die zu weiteren Kraftstoffeinsparpotentialen führen. Um die Betriebspunkte im niederen Teillastbereich einer VKM zu vermeiden, bedient man sich gegenwärtig dem sogenannten Downsizing. Hierdurch verlagert man den Betrieb der VKM in höhere, und somit in Lastbereiche mit günstigerem Wirkungsgrad. Weitere Kraftstoffeinsparpotentiale werden durch Start/Stop-Systeme sowie Zylinderabschaltung erreicht.

Zusammen mit Anstrengungen zur Gewichtsreduzierung auf der Gesamtfahrzeugebene tragen die genannten Technologien dazu bei, Kraftstoffeinsparpotentiale im konventionellem Fahrzeugantriebsstrang wirtschaftlich zu erschließen, um das vom EU-Rat und Parlament vorgegebene Ziel von 95g CO<sub>2</sub>/km bis zum Jahre 2020 zu erreichen.

Die Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung, insbesondere das Downsizing, führen zu höheren Torsionsschwingungsanregungen durch die VKM. Um den hohen Kundenerwartungen hinsichtlich des Komforts gerecht zu werden, kommen Systeme zur Isolation und Dämpfung der Drehungleichförmigkeiten im Restsystem des Triebstranges zum Einsatz. Eine Abstimmung der Systeme zur Drehungleichförmigkeitsberuhigung im Gesamtsystem Fahrzeug, ist unter der Restriktion verkürzter Entwicklungszeiten nur mit Hilfe zweckmäßiger simulationsgestützter Methoden durchführbar. Der Fahrzeugentwickler muss frühzeitig im Produktentwicklungsprozess geeignete numerische und/oder physische Triebstrang- und Fahrzeugmodelle bilden und anwenden, um gesicherte Aussagen über das zu erwartende NVH-Verhalten machen zu können.

## **2. Validierung in der Antriebssystem-Entwicklung**

Entscheidungen wie die Machbarkeit einer trockenlaufenden Doppelkupplung oder die Auswahl eines Schwingungsdämpferkonzepts für zukünftige Verbrennungsmotoren müssen einerseits möglichst früh im Produktentstehungsprozess getroffen werden. Andererseits basieren diese Entscheidungen auf teilweise komplexen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Antriebssystemkomponenten, die in Abhän-

gigkeit von Verhalten und ggf. Komfortempfinden des Fahrers sowie Umgebungseigenschaften beurteilt werden müssen.

## 2.1 X-in-the-Loop Ansatz

Als eine universelle Vorgehensweise zur effizienten Fahrzeugentwicklung, die u.a. das Ziel hat die Grenzen zwischen physischer und numerischer Modellbildung zu überwinden, hat sich der X-in-the-Loop Ansatz (XiL), siehe Bild 1, bewährt. Der XiL Ansatz ermöglicht die Validierung, d.h. die Absicherung von Antriebssystemen über weite Strecken der Entwicklung, ohne dabei auf Gesamtsystemprototypen angewiesen zu sein [6]. Angelehnt an bekannte Hardware-in-the-Loop-Konzepte wird beim XiL die Unit-Under-Test (UUT) – der Untersuchungsgegenstand – im Gesamtsystemkontext mit einer geeigneten Restsystemsimulation sowie den Fahrer- und Umgebungswchselwirkungen validiert.

Am IPEK – Institut für Produktentwicklung wurden zahlreiche Prüfstände nach dem XiL-Konzept realisiert. Der Antriebsbaugruppenprüfstand [7, 8] war eines der ersten Systeme mit elektrischer Verbrennungsmotorsimulation. Mit dem Powerpack-Prüfstand sowie seinem Vorgängerprüfstand [9, 10] können einzelne Triebstrangkomponenten wie Dämpfer oder Kupplungen im virtuellen Gesamtsystemkontext analysiert werden. Ergänzend zu den gekoppelten virtuellen und physischen Methoden beschreibt der XiL Ansatz auch das Vorgehen bei rein virtuellen Validierungsaktivitäten [11].

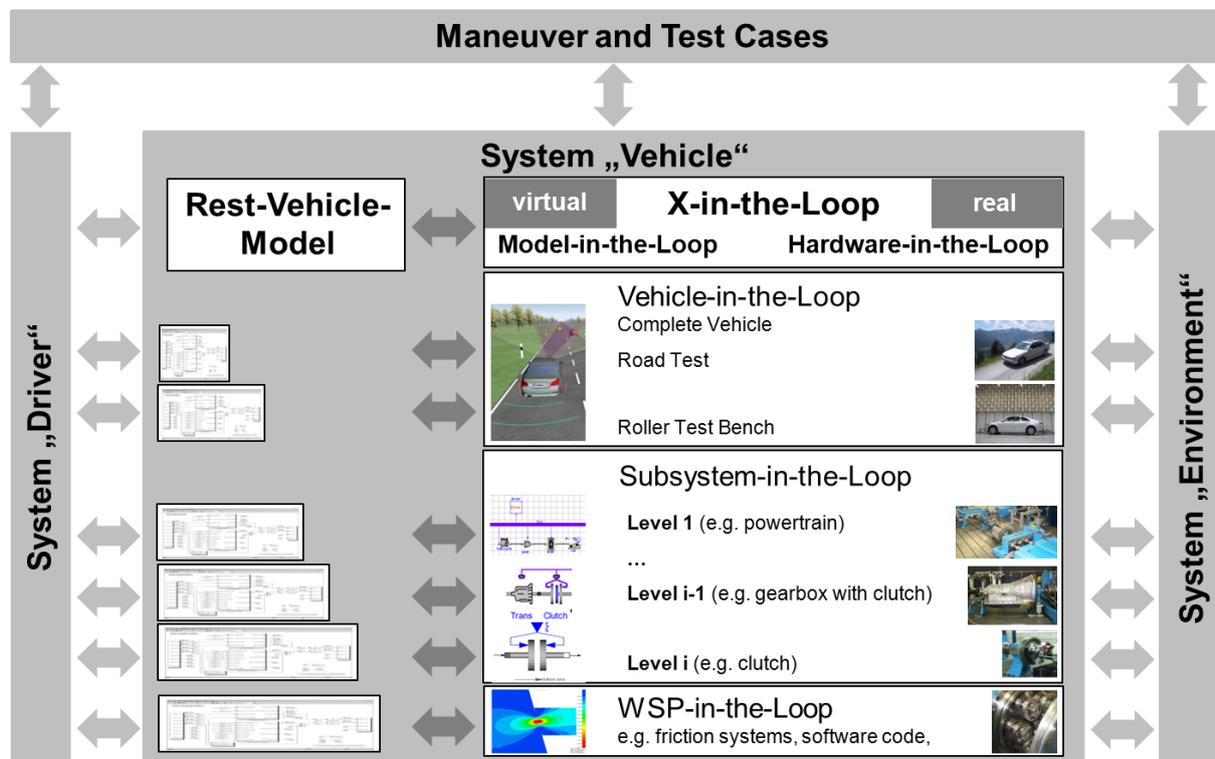


Bild 1: X-in-the-Loop Ansatz [6]

## 2.2 Wechselwirkungen und Eigenschaften von System, Fahrer und Umgebung

Grundlage für die XiL Validierung von Antriebssystemen ist ein ganzheitliches Verständnis aller mit dem Triebstrang in Wechselwirkung stehenden Systeme. Bild 2 zeigt diese Wechselwirkungen.

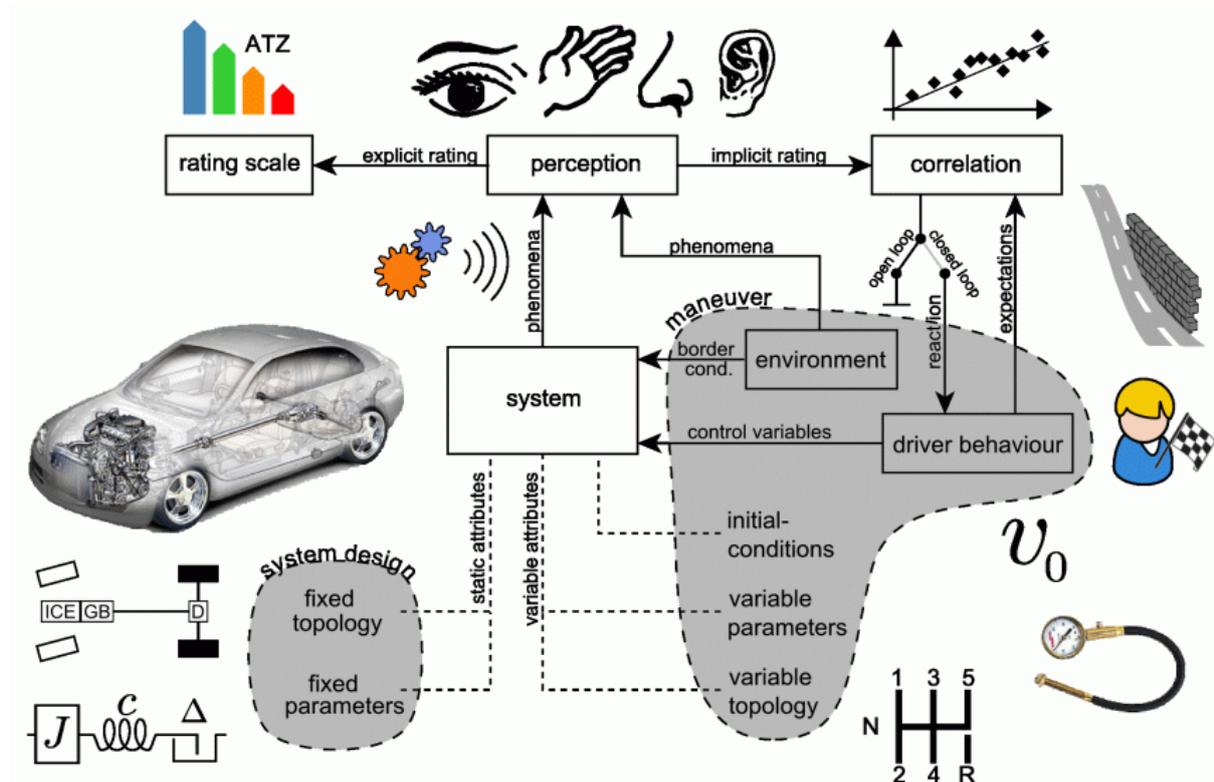


Bild 2: Wechselwirkungen und Eigenschaften von System, Fahrer, Umgebung [12]

Das Gesamtantriebssystem wird charakterisiert über seine Struktur (Topologie) und Parameter. Beispielsweise stellen Front- und Allradantriebe zwei unterschiedliche Topologien dar, während die geometrischen Abmessungen festgelegte Parameter sind. Darüber hinaus besitzt der Fahrer die Möglichkeit einzelne Strukturen und Parameter im Betrieb anzupassen, etwa durch seine Gangwahl oder die Zuladung des Fahrzeugs. Weiterhin steuert der Fahrer einzelne Variablen des Antriebssystems, z.B. die Gaspedalstellung oder den Weg des Kupplungspedals. Da es sich bei dem Triebstrang um ein dynamisches System handelt, lassen sich Phänomene beobachten. Diese Phänomene können erwünschte oder unerwünschte Systemzustände zeigen. Systemphänomene werden gemeinsam mit Phänomenen aus der Umgebung vom Fahrer und Fahrgästen im Fahrzeug wahrgenommen und schließlich bewertet. Bei der Bewertung korreliert der Fahrer seine Wahrnehmung mit seinen Erwartungen. Bei Closed-Loop Manövern wirkt sich die Wahrnehmung schließlich direkt auf das Fahrerverhalten aus.

Als Manöver wird die Umwelt gemeinsam mit dem Fahrerverhalten bezeichnet, ergänzt um die Initialbedingungen und die variablen Systemattribute [13].

## 2.3 Top-Down Ansatz zur Beschreibung von Antriebssystemen

Die Validierung nach dem XiL Ansatz bedingt stets eine Modellbildung des gesamten Antriebssystems und seiner Umgebung sowie eine Aufteilung in den Untersuchungsgegenstand (Unit-under-test, UUT) sowie das Restsystem.

Auf dem Gebiet der Konstruktion, d.h. der Modellbildung mit CAD-Systemen ist das Top-down-Vorgehen verbreitet und anerkannt. Ausgehend von einem leeren Gesamtsystem-Platzhalter auf oberster Ebene werden zuerst leere Komponenten mit gemeinsamen Schnittstellen definiert, die anschließend mit Inhalt gefüllt werden. Damit vergleichbar ist die objektorientierte Entwicklung von Software. Im Gegensatz dazu werden beim Bottom-up-Vorgehen vorgefertigte Komponenten zusammengesetzt. Für die Bildung von Validierungsmodellen ist das Top-Down Vorgehen kaum etabliert. In den meisten Fällen werden bei der Implementierung von Simulationsmodellen vorgefertigte Bibliotheks-Elemente verwendet, d.h. die Modellbildung unterwirft sich den Einschränkungen der jeweiligen Simulationsumgebung. Ähnlichen Einschränkungen unterliegt meist die grundlegende Modellbildung bei der Konzeption von gekoppelten physischen und virtuellen Validierungsaktivitäten.

Bild 3 zeigt schematisch einen Top-Down-Ansatz zur Modellbildung am Beispiel der Validierung von Antriebssystemen [12]. Das System Fahrzeug wird in Restsystem (remaining system) und Untersuchungsgegenstand (system under test oder unit under test, UUT) unterteilt, wobei die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Subsystemen zunächst nicht festgelegt sind.

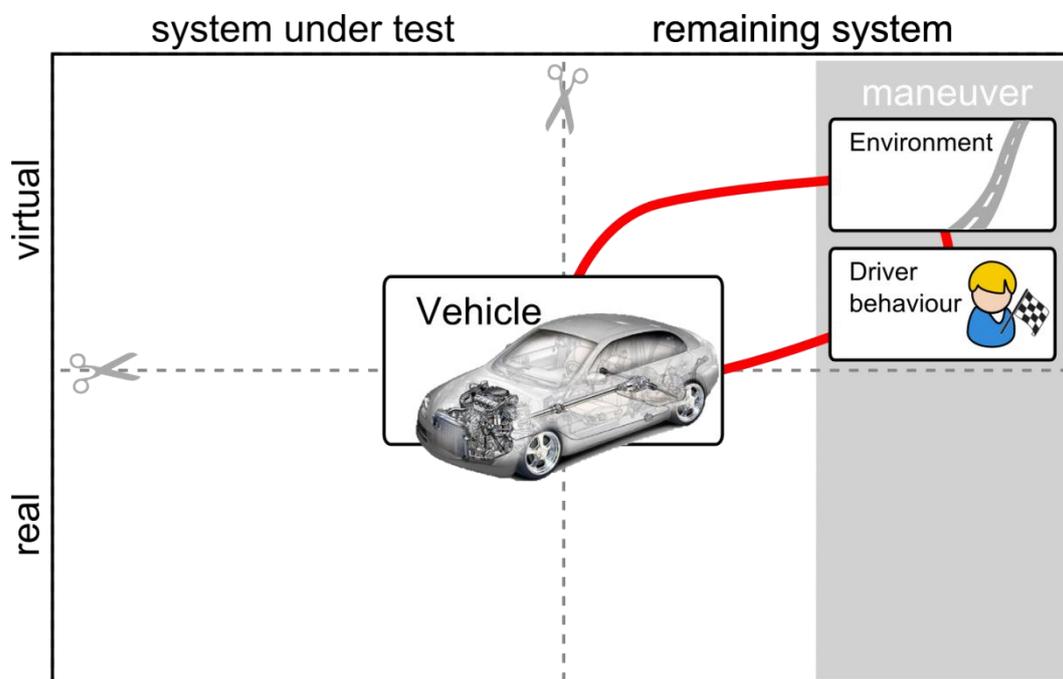


Bild 3: Top-down-Ansatz zur Modellbildung in der Antriebssystem-Validierung [12]

Die Herausforderung in der Modellbildung liegt nun darin zu entscheiden, welche Anforderungen die jeweilige Validierungsaufgabe an die Hardware- und Softwareumgebung stellt.

Neben der grundlegenden Anforderung an die Modelle, die zu untersuchende Phänomene abbilden zu können, müssen im Rahmen von gekoppelten physischen und

virtuellen Validierungsaktivitäten Einschränkungen berücksichtigt werden. Dies sind z.B. die verfügbare Dynamik von Prüfstandsmotoren, mechanische Eigenschaften des Prüfstands wie Koppelsteifigkeiten oder die Leistungsfähigkeit der Echtzeitumgebung.

Vor diesem Hintergrund muss als nächster Schritt in der Modellbildung beurteilt werden, welche Subsysteme zum einen in welcher Detaillierung abgebildet werden müssen und zum anderen als Echtzeitmodelle implementiert werden können, siehe Bild 4. Der machbare Detaillierungsgrad hängt dabei oftmals von der Reife des Produkts (product maturity) innerhalb des Entstehungsprozesses ab. Umgekehrt ist es aber zweckmäßig, abhängig vom Untersuchungsziel generische Modelle zu verwenden, auch wenn umfangreichere Informationen vorliegen.

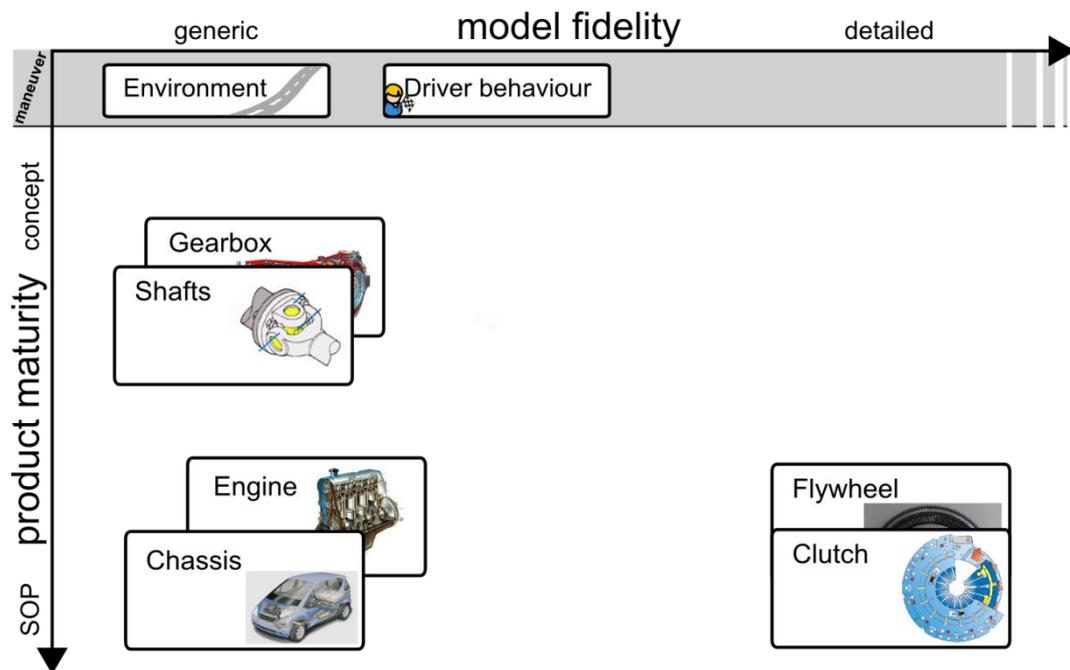


Bild 4: Einordnung von Teilsystemen nach Modellgenauigkeit und Systemreife [12]

### 3. Umsetzung des Validierungsansatzes

Mit dem Powerpack-Prüfstand wurde am IPEK eine leistungsfähige Validierungsumgebung für Kupplungs- und Torsionsdämpfersysteme umgesetzt. Neben hochdynamischen Antrieben (Leistungsdaten siehe Bild 5) verfügt dieser Prüfstand über eine performante Regelungshardware, die auch bei komplexen Restsystem-Schwingungsmodellen die Simulation in Echtzeit erlaubt. Bei einer eindimensionalen Implementierung und Diskretisierung des Restsystems in zehn Einzelträgheiten werden mit der eingesetzten Hardware Rechenfrequenzen von bis 40 kHz erreicht. Die erforderliche hohe Datenaustauschrate zwischen Prüfstandsautomatisierung und Leistungselektronik wird durch den Einsatz eines EtherCAT Bussystems gewährleistet.

Damit erlaubt der Prüfstand hochdynamische Untersuchungen mit Echtzeitsimulation des Verbrennungsmotorverhaltens sowie der Schwingungswechselwirkungen mit dem restlichen Antriebssystem.

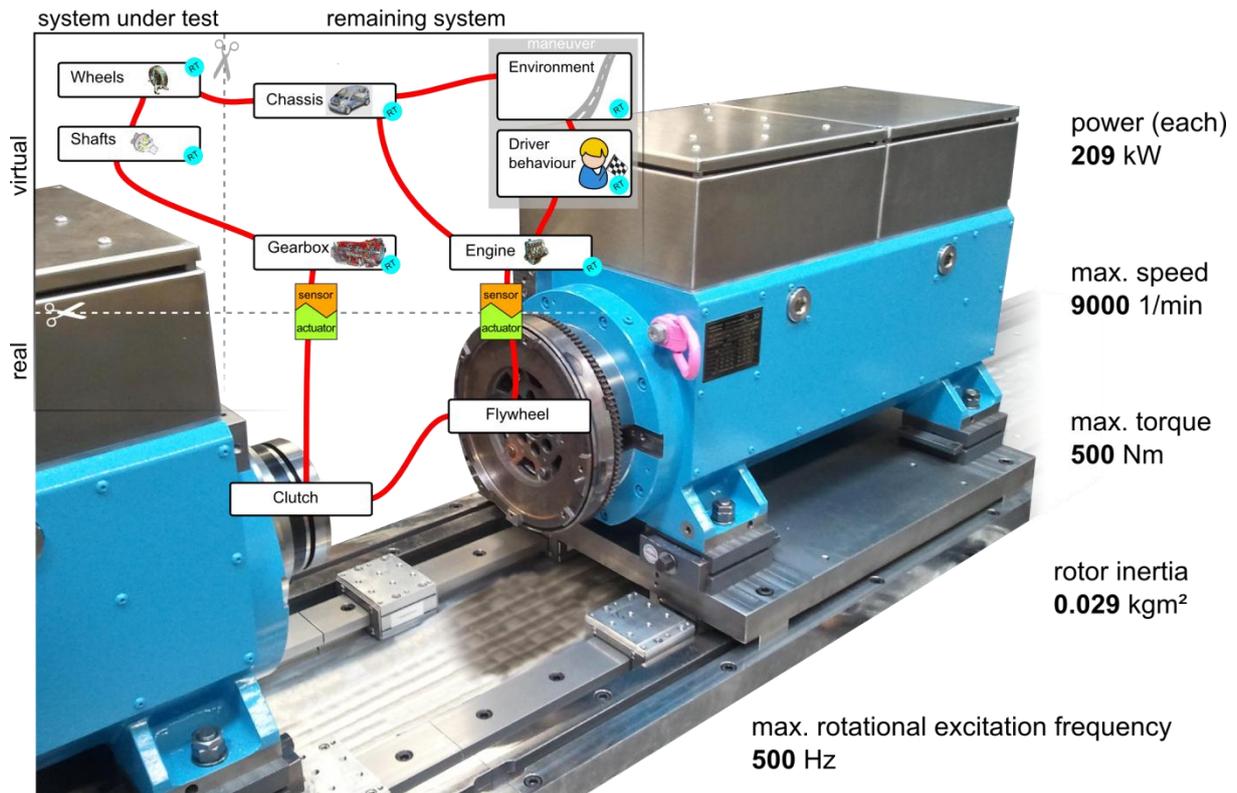


Bild 5: Powerpack-Prüfstand: Schematische Darstellung & technische Daten

### 3.1 Elektrische Verbrennungsmotorsimulation

Die Vorteile der elektrischen Verbrennungsmotorsimulation gegenüber dem realen VKM-Betrieb liegen zum einen in der Reproduzierbarkeit von Versuchen, einer sehr guten Wiederholbarkeit von untersuchungsrelevanten VKM-Zuständen (z.B. Drehmomentanregung im Kaltstartbetrieb). Zudem entfallen Umrüstzeiten am Prüfstand zur Untersuchung unterschiedlicher VKM-Konzepte sowie gesonderte Brandschutz- und Abgasnachbehandlungsvorkehrungen, die mit dem Betrieb von Verbrennungskraftmaschinen vorgeschrieben sind.

Der Verbrennungsprozess wird aufgrund seiner Komplexität und der restringierenden Echtzeitanforderung oftmals über empirische Modelle in Zylindersystemen mit homogener Gasdurchmischung (Ein-Zonen-Modelle) abgebildet. Die Parameter zur Beschreibung des Verbrennungsprozesses können entweder über numerische, offline Brennverfahrenssimulationen, wie beispielsweise Computational Fluid Dynamics (CFD), oder aus Messungen am realen 1-Zylinder Versuchsaggregat gewonnen werden.

Zur Umsetzung der elektrischen Verbrennungsmotorsimulation wurden am IPEK VKM-Modelle in MatlabSimulink erstellt und als kompilierter C-Code auf das Echtzeitsystem übertragen.

Mit Hilfe des VKM-Modells können sowohl heutige als auch zukünftige Viertaktmotoren mit neuen Brennverfahren abgebildet werden. Eine Desachsierung des Kolbens gegenüber der Zylinderachse kann im Modell berücksichtigt werden. Die Zylinderanzahl ist frei konfigurierbar und nur bei deutlich mehr als zwölf Zylindern durch die

Echtzeitperformance beschränkt. Auch eine Zylinderabschaltung während des VKM-Betriebes ist mit diesem Modell in Echtzeit darstellbar.

Der Arbeitsprozess wird über die vier Arbeitstakte (Einlass, Verdichtung, Expansion und Auslass) sowie den Verbrennungsprozess berechnet. Der dabei zugrunde liegende Massen- und Wärmestrom wird über die Systemgrenzen (siehe Bild 6) eines einzelnen Zylinders betrachtet.

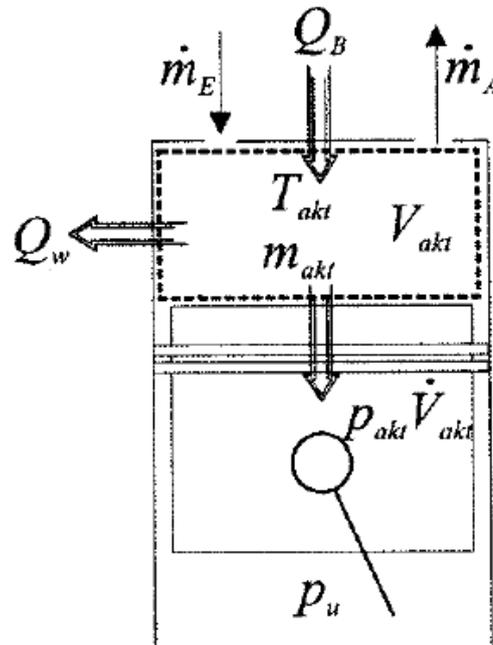


Bild 6: Systemgrenzen im VKM-Zylindermodell [14]

Zur Berechnung des aktuellen Gasdrucks und der Gastemperatur innerhalb der Systemgrenze wird das Arbeitsmedium als ideales Gas angenommen. Die innere Energie des Arbeitsgases, die im Allgemeinen eine Funktion des Gasdruckes, der Gastemperatur und des Luftverhältnisses ist, wird im Modell als konstant angenommen. Der Massenstrom in das System über die Einlass- und Auslassorgane wird über die allgemeine Durchflussgleichung (1) beschrieben.

$$\dot{m} = \mu * A * \sqrt{p_1 * \rho_1} * \sqrt{\frac{2 * \kappa}{\kappa - 1} \left( \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\kappa} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right)} \quad (1)$$

Mit

$\mu$  - Durchflusszahl

$\kappa$  - Adiabatenexponent

$p_{1,2}$  - Drücke vor bzw. nach der Überströmbohrung

$\rho_1$  - Dichte vor der Überströmbohrung

Zur Berechnung des Durchflussquerschnittes wird eine Annäherung (2) nach Müller [15] verwendet. Hierbei wird der Durchflussquerschnitt am Ein- und Auslass über eine Sinusfunktion, die über das Ventilöffnungsintervall gültig ist, angenähert.

$$A(\theta) \approx \frac{\pi}{30 * 0.4^2} * d_v^2 * \sin\left(\pi \frac{\theta - \theta_{E\ddot{O}/A\ddot{O}}}{4\pi + \theta_{ES/AS} - \theta_{E\ddot{O}/A\ddot{O}}}\right) \quad (2)$$

Mit

$\Theta$  - Aktueller Kurbelwinkel

$A(\theta)$  - Durchflussquerschnitt

$d_v$  - Ventildurchmesser

$\theta_{(E\ddot{O}/ES/A\ddot{O}/AS)}$  - Öffnungs- und Schließwinkel der Einlass- und Auslassventile

Für die Verdichtungs- und Expansionsphase werden isentrope Zustandsänderungen angenommen. Der Zustand des Arbeitsmediums während der Verbrennungsphase, die üblicherweise am Ende des Verdichtungstaktes beginnt, ist im Wesentlichen eine Funktion des Brennstoffwärmestroms sowie des Wandwärmestroms. Der Brennstoffwärmestrom wird im VKM-Modell über den Ersatzbrennverlauf nach Vibe [16] modelliert. Der Vibe-Ersatzbrennverlauf erlaubt es den tatsächlichen Brennverlauf im Zylinder, z.B. aus Indizierdaten, über den Vibe-Formparameter, den Umsetzungsgrad, die gesamte Verbrennungsdauer im Zylinder sowie über die aktuell vorliegende Verbrennungsdauer, anzunähern. Weitere Details zur Berechnung des Ersatzbrennverlaufes nach Vibe sind in [17] zu entnehmen. Die Vibe-Parameter zur Beschreibung des Ersatzbrennverlaufes werden im umgesetzten VKM-Modell als konstant angenommen.

Zur Berechnung der Wandwärmeverluste wird der Wärmeübergangskoeffizient ( $\alpha$ ) nach dem Ansatz von Hohenberg [18] angenähert:

$$\alpha(\theta) = 130 * V_z(\theta)^{-0.06} * p_z(\theta)^{0.8} * T_z(\theta)^{-0.4} * (c_m + 1.4)^{0.8} \quad (3)$$

Mit:

$(V,p,T)_z$  - Aktuelles Zylindervolumen, akt. Zylinderdruck, akt. Zylindertemperatur

$c_m$  - Mittlere Kolbengeschwindigkeit

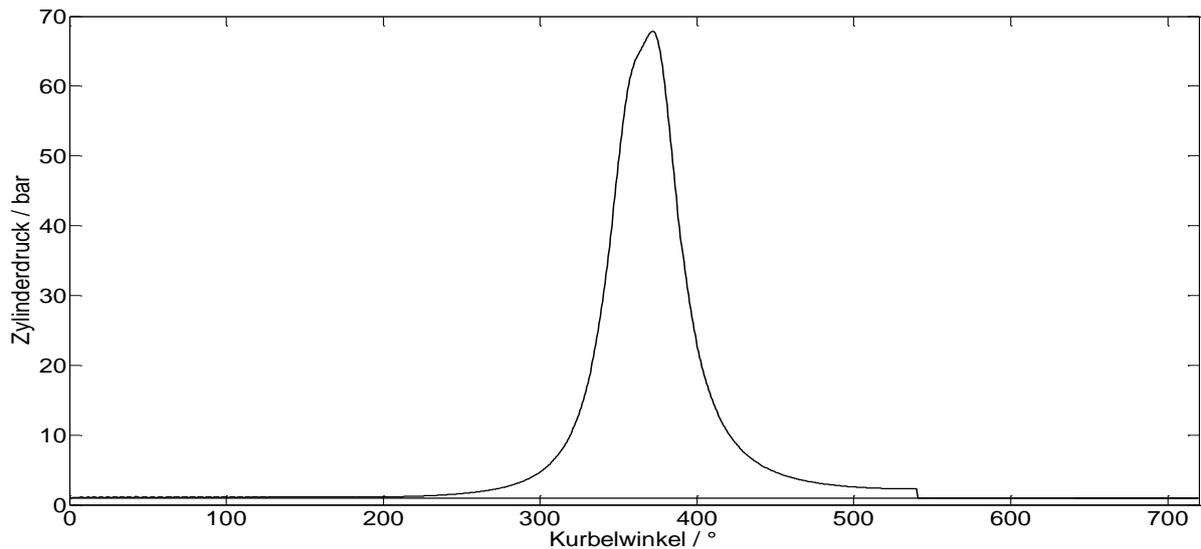
Die allgemeine Bewegungsgleichung (4) zur Beschreibung der Kurbeltriebsdynamik berücksichtigt die Gasmomente ( $M_{Gas}$ ), die Massenmomente ( $M_{Masse}$ ), das externe Last- ( $M_{Last}$ ) sowie das Reibmoment ( $M_{Reib}$ ). Im Reibmoment, das nach [19] modelliert wird, werden die Verluste an den Kolbenringen, den Gleitlagern, am Ventiltrieb sowie der Kühlwasserpumpe berücksichtigt. Das Reibmoment ist hierbei, im Gegensatz zu den restlichen Momentanteilen, eine über das Arbeitsspiel konstante Größe.

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J} * (M_{Gas}(\theta) - M_{Masse}(\theta) - M_{Last} - M_{Reibung}) \quad (4)$$

Auf die Berechnung des Trägheitsmomentes  $J$  im VKM-Echtzeitmodell kann verzichtet werden, da dieses physisch als Rotorträgheitsmoment des Elektromotors zur Verfügung steht. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass der reale Kurbeltrieb, im Gegensatz zum Rotor des Elektromotors, ein mit der Kurbelwinkelstellung veränderliches Trägheitsmoment aufweist.

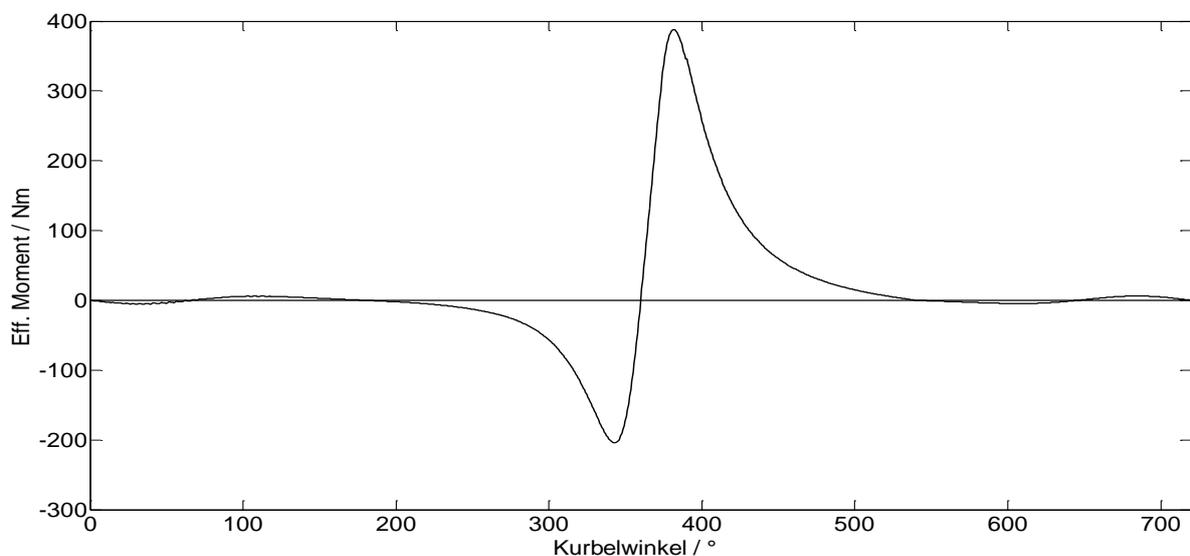
Die kurbelwinkelabhängigen Momente nach (4) werden im Weiteren drehzahlsynchron an den Umrichter als Stellgröße übergeben.

Exemplarisch werden zwei numerische Simulationsergebnisse dargestellt (siehe Bild 7 und Bild 8). Im Bild 7 ist der Zylinderdruckverlauf über ein Arbeitsspiel eines 1-Zylindermotors dargestellt. Beim Öffnen der Auslassventile wurde im Simulationsmodell ein Druckabfall im Zylinder auf den Umgebungsdruck angenommen. Die Drehzahl beträgt für den dargestellten Untersuchungsfall 1000 U/min.



*Bild 7: Simulierter Zylinderdruckverlauf an einem 1-Zylindermotor bei 1000 U/min*

Bild 8 veranschaulicht die Summe aus Gas-, Massen- und Reibmoment unter den gleichen Randbedingungen wie zuvor in Bild 7. Der simulierte Drehmomentverlauf wird an den Umrichter der E-Maschine als Sollgröße übergeben. Im Falle eines Mehr-Zylindermotors erfolgt die Übergabe dieser Sollgröße im entsprechenden Zündwinkel.



*Bild 8: Simuliertes eff. Drehmoment an einem 1-Zylindermotor bei 1000 U/min*

### 3.2 Hochdynamische Restfahrzeugsimulation

Um eine möglichst hohe Flexibilität hinsichtlich der Einstellbarkeit von Restsystemparametern zu haben, ist neben der elektrischen Verbrennungsmotorsimulation auch eine Implementierung des restlichen Fahrzeuges in einem Echtzeitmodell sinnvoll. Dies erlaubt einfache Variationen von Steifigkeiten, Trägheiten oder Dämpfungen und ermöglicht auf diesem Weg Abstimmungsarbeiten, die direkt an die Gestaltung der Antriebsstrangkomponenten gekoppelt sind.

Die neue Validierungsumgebung ermöglicht damit auch eine Betrachtung virtueller Komponenten als Unit-Under-Test (UUT). Beispielsweise wird das Kupplungssystem als realer Bestandteil des Restsystems und die UUT als detailliertes Echtzeitmodell implementiert. Diese Herangehensweise ist vor allem dann zweckmäßig, wenn Phänomene untersucht werden sollen, bei denen nicht-lineare oder spielbehaftete Eigenschaften des Kupplungssystems relevant sind. Gegenwärtig sind diese Eigenschaften durch Simulationsmodelle noch nicht hinreichend genau abbildbar, z.B. bei der Simulation von Reibung oder Stoßvorgängen.

In einer Beispielanwendung wird der Einfluss von Reifen- und Seitenwellenparametern auf die Schwingungsübertragung im Antriebsstrang untersucht. Das grundlegende Validierungsmodell ist in Bild 9 dargestellt. Untersuchungsgegenstand ist die virtuelle Abbildung von Reifen und Seitenwellen, das Restsystem besteht teilweise aus virtuellen Komponenten und dem realen Kupplungssystem.

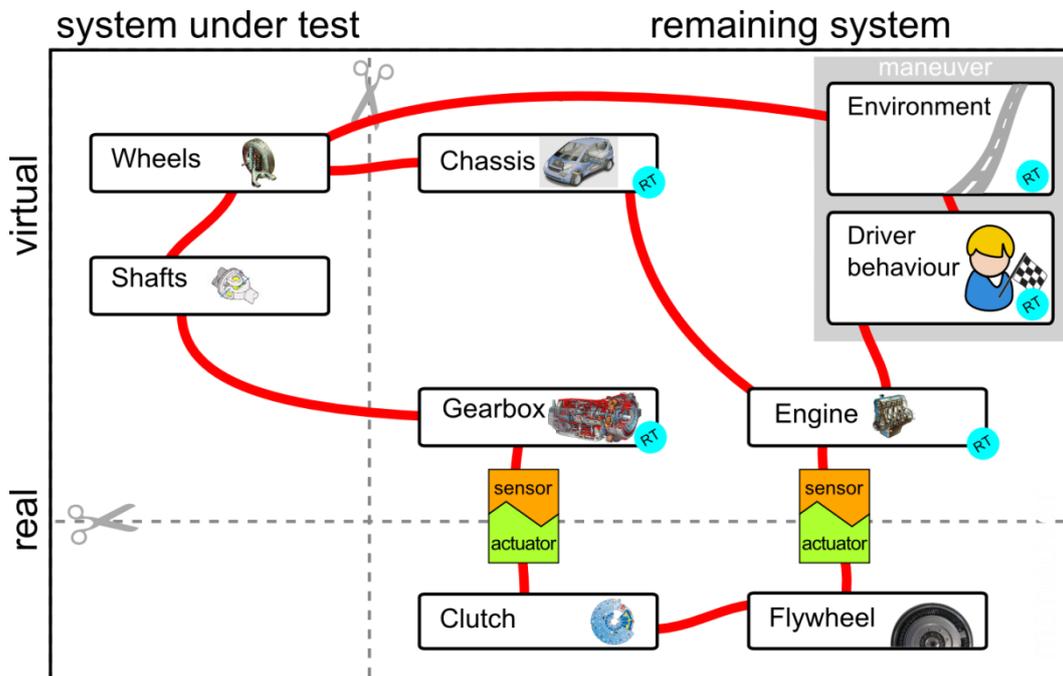


Bild 9: Modelltopologie für Seitenwellen und Räder als virtuelle UUT

In Bild 10 ist die analytische Modalanalyse des gesamten Schwingungsmodells bestehend aus Untersuchungsgegenstand und Restsystem dargestellt, siehe auch [20]. Dieses Schwingungsmodell hat Eigenfrequenzen bis 312 Hz und deckt damit einen großen Bereich verbrennungsmotorischer Anregungen ab. Darin ist u.a. die Ruckel-Eigenfrequenz bei 6,3 Hz, die ZMS-Resonanz bei 14,1 Hz sowie eine Eigenform bei 55,1 Hz zu sehen, die durch Reifen- und Gelenkwellensteifigkeiten beeinflusst ist.

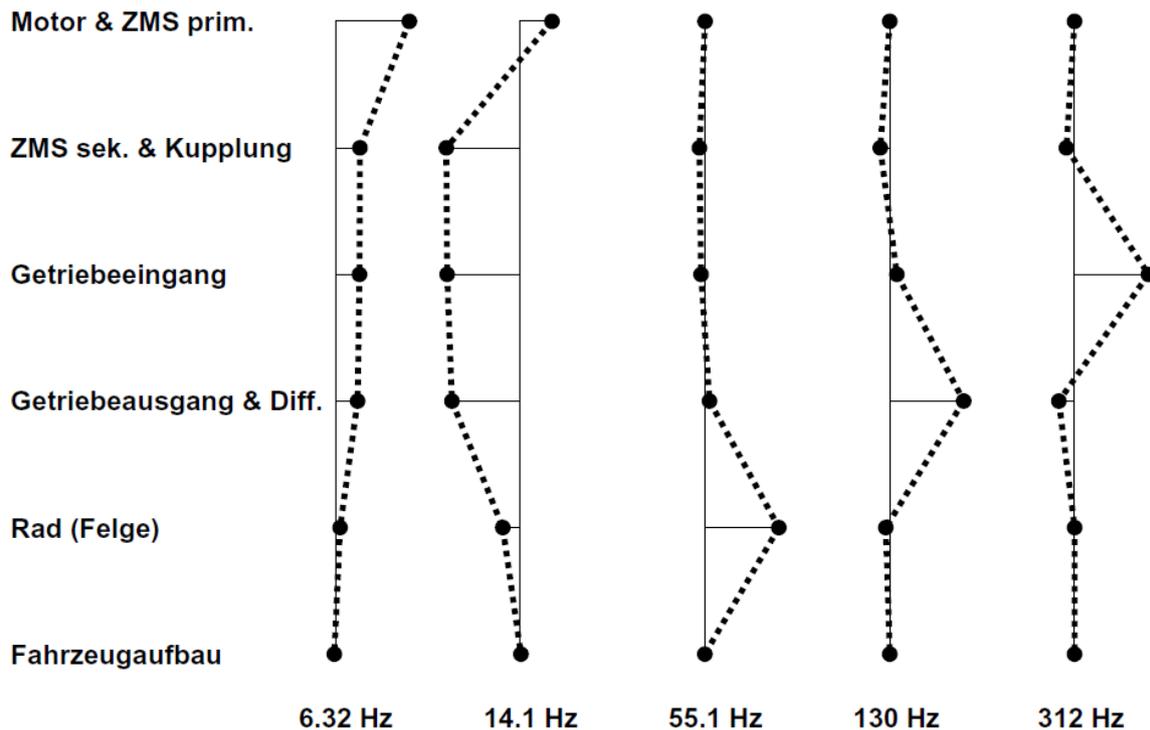


Bild 10: Schwingungsmodell und analytische Modalanalyse [20]

In Bild 11 sind die Ergebnisse zweier Frequenzsweeps am Antrieb von 1-10 Hz bzw. 10-100Hz zur Analyse der Übertragungseigenschaften dargestellt. Die Übertragungsfunktionen zeigen die Amplitudenverhältnisse von Drehzahlen an verschiedenen Stellen des Echtzeitmodells bezogen auf die Drehmomentanregung des Motors.

Die Ruckel-Eigenfrequenz stimmt mit der analytischen Rechnung nicht genau überein, da das Spiel im ZMS sowie die variierende Steifigkeiten, die sich durch die großen Winkelamplituden im unteren Frequenzbereich ergeben, in die Modalanalyse nicht einfließen. Im unteren Diagramm sind die ZMS-Eigenfrequenz bei ca. 14Hz sowie die Reifeneigenform bei ca. 55Hz zu erkennen.

Die Validierungsumgebung ermöglicht nun z.B. die Abstimmung von Reifen- und Gelenkwelleneigenschaften hinsichtlich der Schwingungsniveaus an verschiedenen Stellen des Antriebssystems. Das obere Diagramm in Bild 12 stellt das Ergebnis einer Variation der Gelenkwellendämpfung bzgl. der Ruckelschwingungsamplituden an den verschiedenen Triebstrangstellen dar. Das untere Diagramm zeigt die Ausprägung der Reifeneigenform, d.h. die Übertragungsfunktion Anregung – Rad (Felge), bei verschiedenen Reifen- und Gelenkwellendämpfungen.

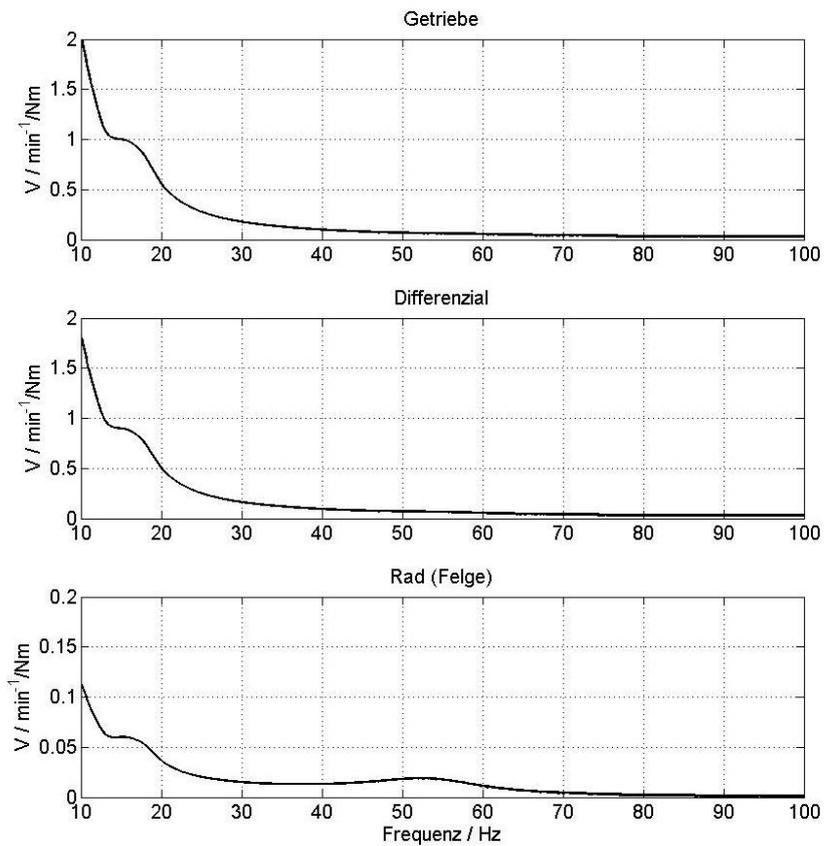
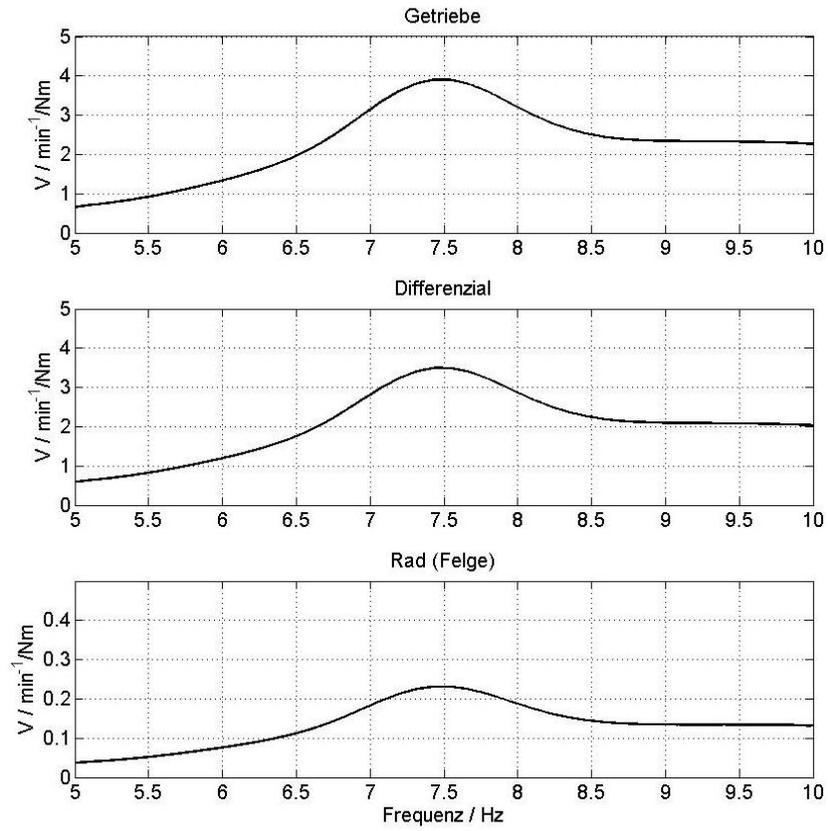


Bild 11: Übertragungsfunktionen 1-10Hz (oben) und 10-100Hz (unten)

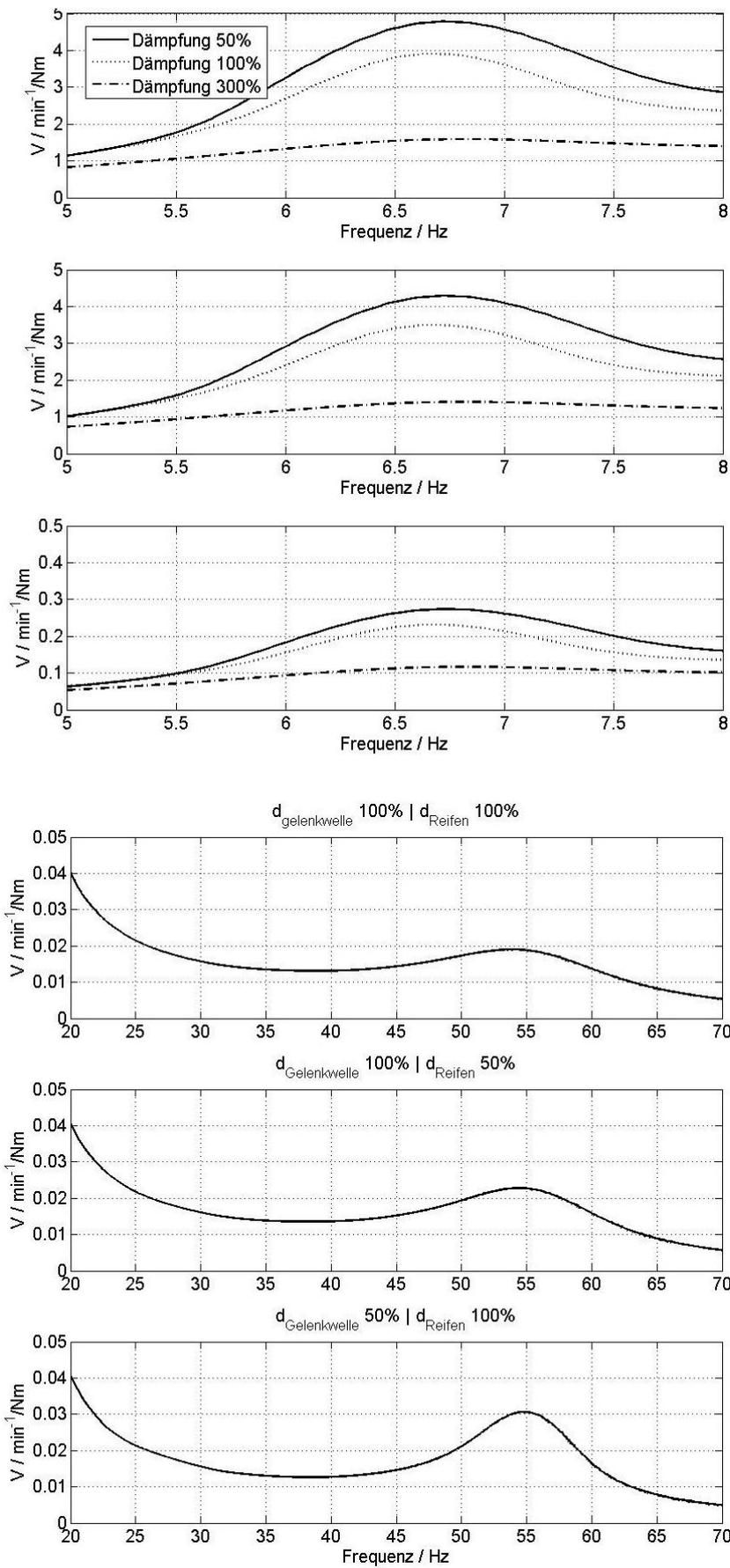


Bild 12: Variation virtueller Dämpfungsparameter

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Mit den Versuchen in Kapitel 3.2 konnte die Machbarkeit einer detaillierten Echtzeitsimulation des Antriebssystems mit gekoppeltem physischem Kupplungssystem nachgewiesen werden. Die neue Validierungsumgebung für Kupplungs- und Dämpfersysteme ermöglicht vielfältige Validierungsaufgaben, z.B. Abstimmungsarbeiten, die bereits in frühen Phasen der Antriebssystem-Entwicklung parallel zu Gestaltungsaktivitäten durchgeführt werden können.

Weiteres Potential liegt in der konsequenten Erweiterung der Echtzeitmodelle, z.B. die Berücksichtigung von Spielen zur Untersuchung von Getrieberasseln oder die Implementierung einer erweiterten Verbrennungsmotorsimulation mit Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Verbrennung und Schwungradschwingungen.

Um moderne DI-Dieselmotorenverfahren in der elektrischen Verbrennungsmotorsimulation abbilden zu können, werden am IPEK weitere Ansätze zur Beschreibung dieser Brennverfahren im VKM-Modell implementiert. Hierzu gehört z.B. der Ansatz zur Beschreibung des Brennverlaufes über den Doppel-Vibe Ansatz. Eine Betriebspunktverschiebung der VKM, z.B. während eines Drehzahlhochlaufes, impliziert auch eine Änderung der Vibe-Parameter. Eine Anpassung dieser Parameter, ausgehend von einem Referenz- auf weitere Betriebspunkte, soll für das dieselmotorische Brennverfahren nach Urlaub [21] vorgenommen werden.

Ein wesentlicher Aspekt weiterer Untersuchungen stellen die transienten Betriebszustände des Verbrennungsmotors dar. Hier soll insbesondere der Verbrennungsmotorstart herausgestellt werden, der in konventionellen aber auch hybridisierten Triebsträngen einen wesentlichen Einfluss auf das NVH-Verhalten des Gesamtfahrzeuges hat.

## Literatur

- [1] Schulz, J.; Küçükay, F.; Haller, W.: Drag torque reduction by separating springs in open E3 AT-clutches and their influence on efficiency and CO<sub>2</sub> emission. In: 11. Internationales CTI Symposium Innovative Fahrzeug-Getriebe. Berlin, 2012.
- [2] Freitag, J.; Gerhardt, F.; Hausner, M.; Wittmann, C.: Das Kupplungssystem der Zukunft. In: 9. LuK Kolloquium. Bühl, 2010.
- [3] Jäggle, G.; Kimmig, K.; Berger, R.; Boeuf, J.: Systemauslegung von Doppelkupplungen für große und kleine Fahrzeuge. In: VDI-Berichte 1987, Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme. Düsseldorf, 2007.
- [4] Brezger, F.; Albers, A.: Modelling of oil heating of disengaged lubricated clutches in hybrid vehicles. In: 34th International Automobile Technical Congress of FISITA. Peking, 2012.
- [5] Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.: Innovative Antriebstechnologien, Elektromobilität und alternative Kraftstoffe für unsere Mobilität von morgen, Potenziale – Herausforderungen – Perspektiven. BDI-Positionspapier, Februar 2010
- [6] Düser, T.: X-in-the Loop, ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen, Universität Karlsruhe, Institut für Produktentwicklung, Dissertation, 2010

- [7] Stier, C.; Albers, A.: Analysis of geometrical deviations in clutch systems and their interdependencies in relation to the excitation of judder vibrations. In: 33th International Automobile Technical Congress of FISITA. Budapest, 2010.
- [8] Albers, A.; Stier, C.: Experimentelle Analyse der Dämpfung in PKW-Antriebssträngen in Hinblick auf die Übertragung von Anfahrschwingungen. In: VDI-Berichte 2164, Fachtagung Schwingungsdämpfung. Düsseldorf, VDI Verlag, 2011
- [9] Stier, C.; Geier, M.; Albers, A.: Analyse des Drehzahleinflusses auf das dynamische Übertragungsverhalten von ZMS. In: Systemanalyse in der Antriebstechnik : Expert-Verlag, 2009
- [10] Geier, M. ; Merkel, P. ; Stier, C. ; Albers, A.: Unterstützung der Produktvalidierung durch physikalische Modellbildung am Beispiel des ZMS. In: VDI-Berichte 2077, Fachtagung Schwingungen in Antrieben. Düsseldorf, VDI-Verlag, 2009
- [11] Albers, A.; Geier, M.; Behrendt, M.; Ott, S.: Eine integrierte Entwicklungsumgebung für Antriebsstrangsysteme. In: 7. Internationales CTI Symposium Innovative Fahrzeug-Getriebe. Berlin, 2008.
- [12] Geier, M.; Jäger, S.; Stier, C.; Albers, A.: Combined real and virtual domain product validation using top-down strategies. In: ASME Verification and Validation Symposium. Las Vegas, 2012.
- [13] Albers, A.; Merkel, P.; Geier, M.; Ott, S.: Validation of powertrain systems on the example of real and virtual investigations of a dual mass flywheel in the X-in-the-Loop (XiL) environment. In: 8. Internationales CTI Symposium Innovative Fahrzeug-Getriebe. Berlin, 2009.
- [14] Kositzka, N.: Analyse und Regelung von Schwankungen der Leerlaufdrehzahl eines Dieselmotors. In: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Nr. 1036. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2004
- [15] Müller, M. J.: Abbildung von Verbrennungsmotoren und stufenlosen Getrieben für die Drehschwingungssimulation. Aachen: Verlag Mainz, 1996 (Dissertation)
- [16] Vibe, LI.: Brennverlauf und Kreisprozeß von Verbrennungsmotoren. Berlin: VEB Verlag Technik, 1970
- [17] Merker, G; Schwarz, Ch.; Stiesch, G.; Otto, F.: Verbrennungsmotoren, Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung. Stuttgart/ Leipzig/ Wiesbaden: Teubner, 2006
- [18] Hohenberg, G.: Experimentelle Erfassung der Wandwärme von Kolbenmotoren. Graz, Technische Universität, Habilitation 1980
- [19] Schloßer, A.: Modellbildung und Simulation zur Ladedruck und Abgasrückführregelung an einem Dieselmotor. Düsseldorf: VDI-Verlag, Dissertation 2000
- [20] Albers, A.; Stier, C.; Geier, M.: X-in-the-loop Validierungsmethoden für Kupplungssysteme. In: VDI Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme. Karlsruhe, 2013.
- [21] Urlaub, A.: Verbrennungsmotoren: Grundlagen, Verfahrenstheorie, Konstruktion. 5. Aufl, Berlin: Springer, 1994

**Autoren:**

o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers

Dipl.-Ing. Christian Stier

Dipl.-Ing. Adam Babik

Dipl.-Ing. Martin Geier

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

Karlsruhe