

Prof. Dr.-Ing. Günther Hohenberg, Technische Universität Darmstadt

Dipl.-Ing. Tom Dein Dias Terra, Technische Universität Darmstadt

Dr.-Ing. Christian Schyr, Universität Karlsruhe

Dr. techn. Kurt Gschweidl, AVL List GmbH

Dipl.-Ing. Christopher Christ, AVL Deutschland GmbH

Anforderungen an Prüfstände für Hybridfahrzeuge

1. Einleitung

Die serienreife Entwicklung alternativer Antriebskonzepte, insbesondere der Hybridantriebe mit einer Kombination aus Verbrennungsmotor und Elektromotor, erfordert auch im Bereich der Prüfstandstechnik neue innovative Ansätze und Lösungen. Die Hybridantriebe als Technologieträger und -treiber entwickeln sich neben den konventionellen Motor- und Getriebekonzepten als eigenes Antriebssegment. Um die neuen Technologien zuverlässig in Serie zu entwickeln, lastet derzeit hoher Handlungsdruck auf Fahrzeugherstellern und Zulieferern. Die Herausforderung für alle Beteiligten besteht dabei in der Bewältigung einer deutlich höheren Systemkomplexität und in der disziplinübergreifenden Optimierung der Leistungs-, Verbrauchs-, Emissions- und Komforteigenschaften des Gesamtfahrzeugs. Es stehen nun nicht mehr die rein mechanischen Komponenten im Fokus der Entwicklungsabläufe, sondern das Management der mechanischen, elektrischen und thermischen Leistungs- und Energieströme im hybriden Antriebsstrang. Dabei bilden die Werkzeuge der virtuellen Produktentwicklung eine der Voraussetzungen für die Umsetzung eines effizienten Entwicklungsprozesses.

Im vorliegenden Beitrag werden ausgehend von einer Analyse der unterschiedlichen Antriebskonzepte mit ihren speziellen Betriebsverhalten wie Start/Stop, Boost und Rekuperation die Anforderungen an die zukünftige Prüfstandstechnik in einer durchgängigen Simulationsumgebung abgeleitet. Anschließend werden die Eigenschaften des dynamischen Verbrennungsmotorprüfstandes als zentrales Entwicklungswerkzeug für Hybridantriebe im Rahmen neuer Prüfstandskonzepte vorgestellt.

2. Einteilung der Hybridkonzepte

Hybride Antriebskonzepte lassen sich aus unterschiedlichen Sichten einteilen. In Bild 1 werden beispielhaft derzeit verfügbare Serien- und Konzeptfahrzeuge nach dem Grad der Hybridisierung unterschieden. Die dargestellte Formel basiert auf der elektrischen Antriebsleistung P_E und der verbrennungsmotorischen Antriebsleistung P_{VKM} . Dabei ist zu bemerken, dass die elektrische Leistung P_E durch die maximale Leistungsabgabe des elektrischen Energiespeichers bestimmt wird.

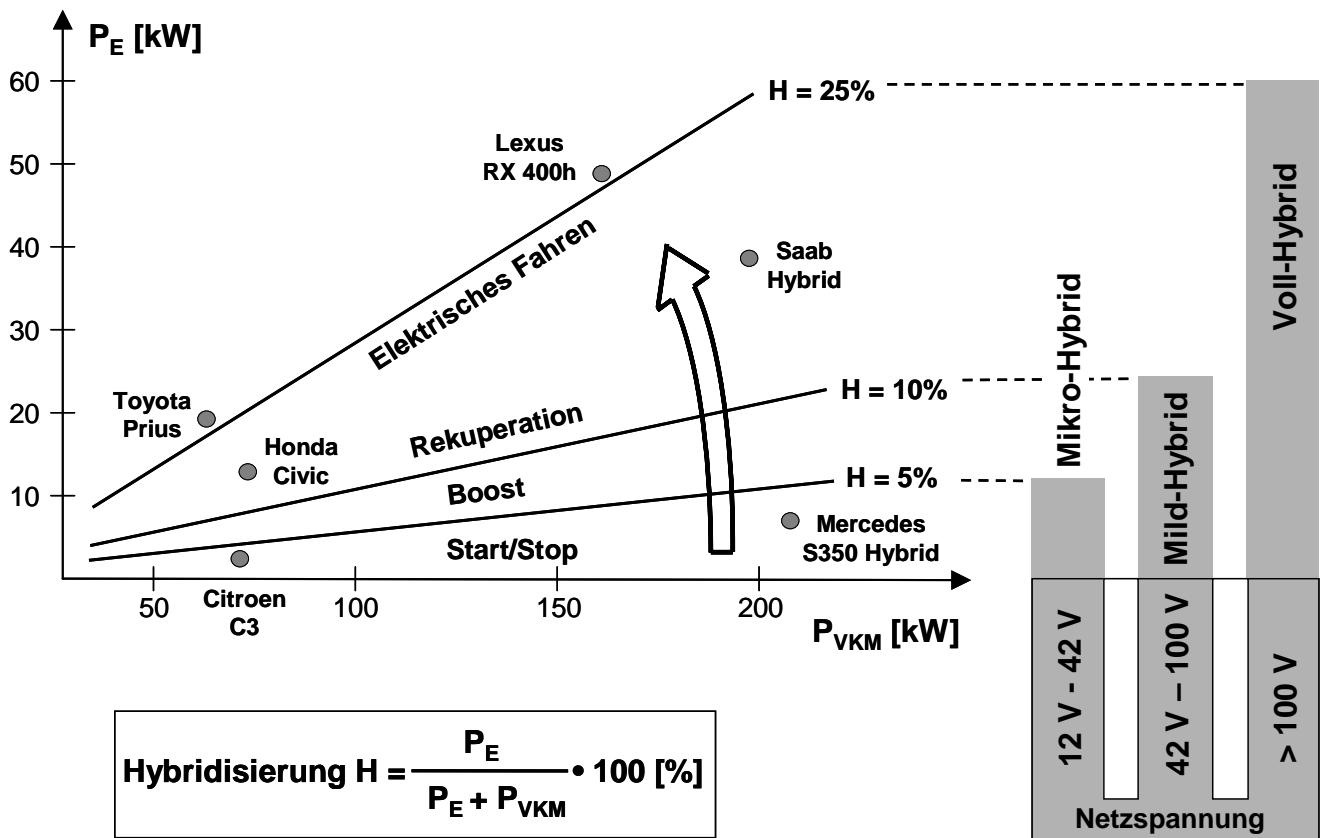


Bild 1: Einteilung der Antriebskonzepte nach dem Grad der Hybridisierung

Der Grad der Hybridisierung H ist entscheidend für die hybridspezifischen Funktionen Start/Stop, Boost, Rekuperation und elektrisches Fahren sowie die Einteilung in die Klassen Mikro-Hybrid, Mild-Hybrid und Voll-Hybrid. Im Bild 1 sind zusätzlich die üblicherweise eingesetzten Netzspannungen der Elektromotoren eingetragen.

Eine weitere Einteilung der Antriebskonzepte erfolgt nach ihrer Struktur im Fahrzeug. In Bild 2 sind konventionelle Antriebskonzepte mit den Varianten Handschaltgetriebe (*Manual Transmission MTR*), Automatikgetriebe (*Automatic Transmission ATR*) und Stufenlos

verstellbares Getriebe (*Continuously Variable Transmission CVT*) den hybriden Konzepten in den Varianten Seriell (*HY-S*), Parallel (*HY-P*) und Leistungsverzweigt (*HY-X*) gegenübergestellt. Bei der parallelen Struktur werden ein oder mehrere Elektromotoren mit oder ohne Kupplungen in unterschiedlichen Anordnungen mit einem mechanischen Übersetzungsgetriebe integriert, während bei der seriellen Struktur die komplette Leistung des Verbrennungsmotors elektrisch gewandelt wird. Bei der leistungsverzweigten Struktur wird über eine integrierte Kombination aus Planetengetrieben, Elektromotoren und Kupplungen eine stufenlose Übersetzung realisiert und dabei ein Teil der verbrennungsmotorischen Leistung direkt mechanisch auf den Abtrieb übertragen.

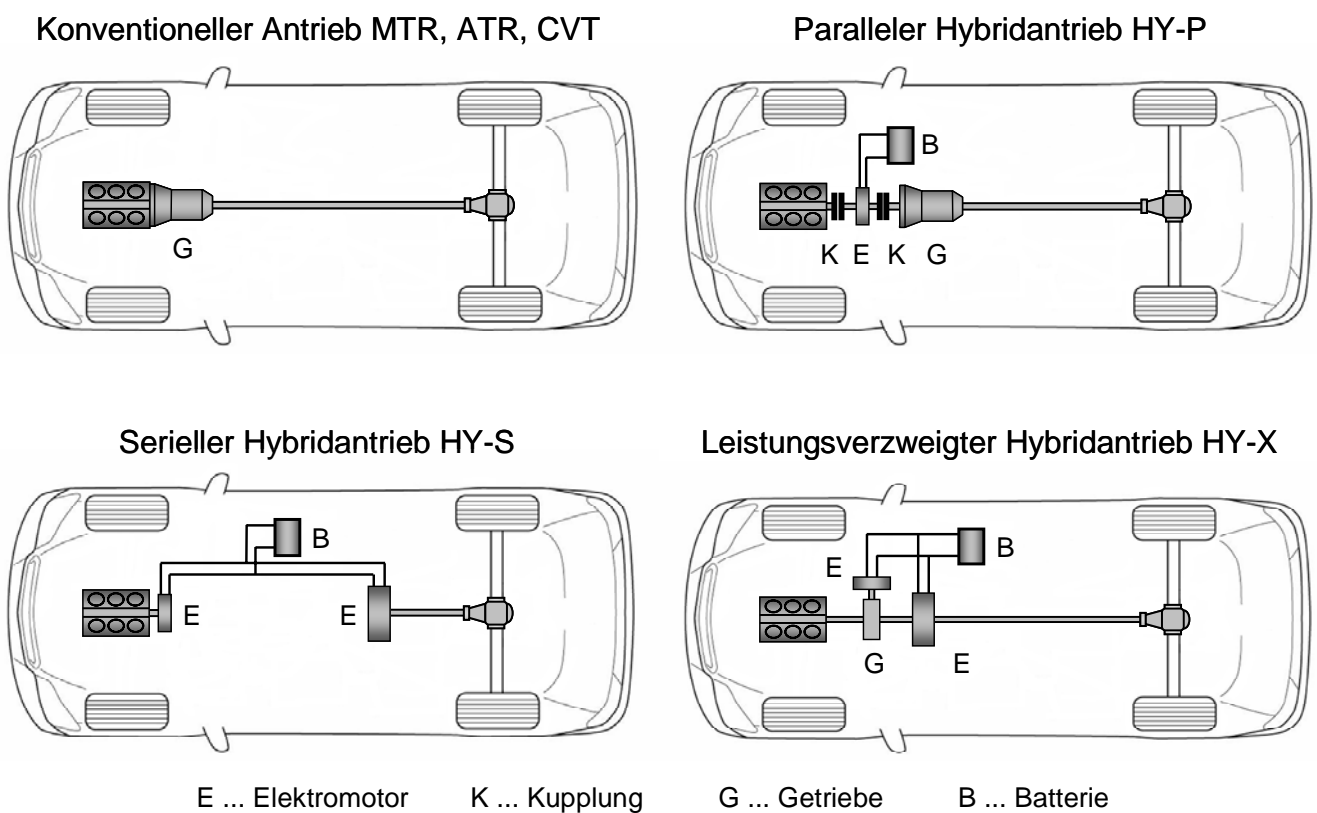


Bild 2: Einteilung der Antriebskonzepte nach ihrer Struktur

Bei den Hybridantrieben werden neben den Steuergeräten für den Verbrennungsmotor (*Engine Control Unit ECU*), das Getriebe (*Transmission Control Unit TCU*) und den Bremseingriff (*Electronic Stability Program ESP*) zusätzliche Steuergeräte für das Batteriemangement sowie Energiemanagement (*Hybrid Control Unit HCU*) eingesetzt. Es folgt damit eine Vielzahl an möglichen Antriebsstrangkonfigurationen, welche sich in den derzeitigen und zukünftigen Fahrzeugvarianten der Hersteller widerspiegelt.

3. Betrieb des Verbrennungsmotors in Hybridfahrzeugen und am Prüfstand

In Bild 3 sind gemessene Drehzahlverläufe der Verbrennungsmotoren von unterschiedlichen Antriebsstrangkzepten im NEFZ-Abgaszyklus auf dem Rollenprüfstand gegenübergestellt. Für die Motorabstimmung kritische Fahrsituationen sind beim konventionellen Antriebsstrang der Motorstart am Zyklusbeginn, das Anfahren aus dem Stillstand, die einzelnen Schaltungen und Lastwechsel sowie beim Automatikgetriebe das Einlegen der Fahrstufe nach dem Motorstart. Beim Hybridantrieb kann hingegen der Verbrennungsmotor in günstigen Drehzahlpunkten betrieben werden, die Herausforderung liegt hier in der Motorabstimmung für die oftmaligen Start- und Stoppvorgänge während der Fahrt sowie für die Umschaltung zwischen verbrennungsmotorischem und elektrischem Fahren („Mode-Shift“), insbesondere bei gleichzeitigem Lastwechsel.

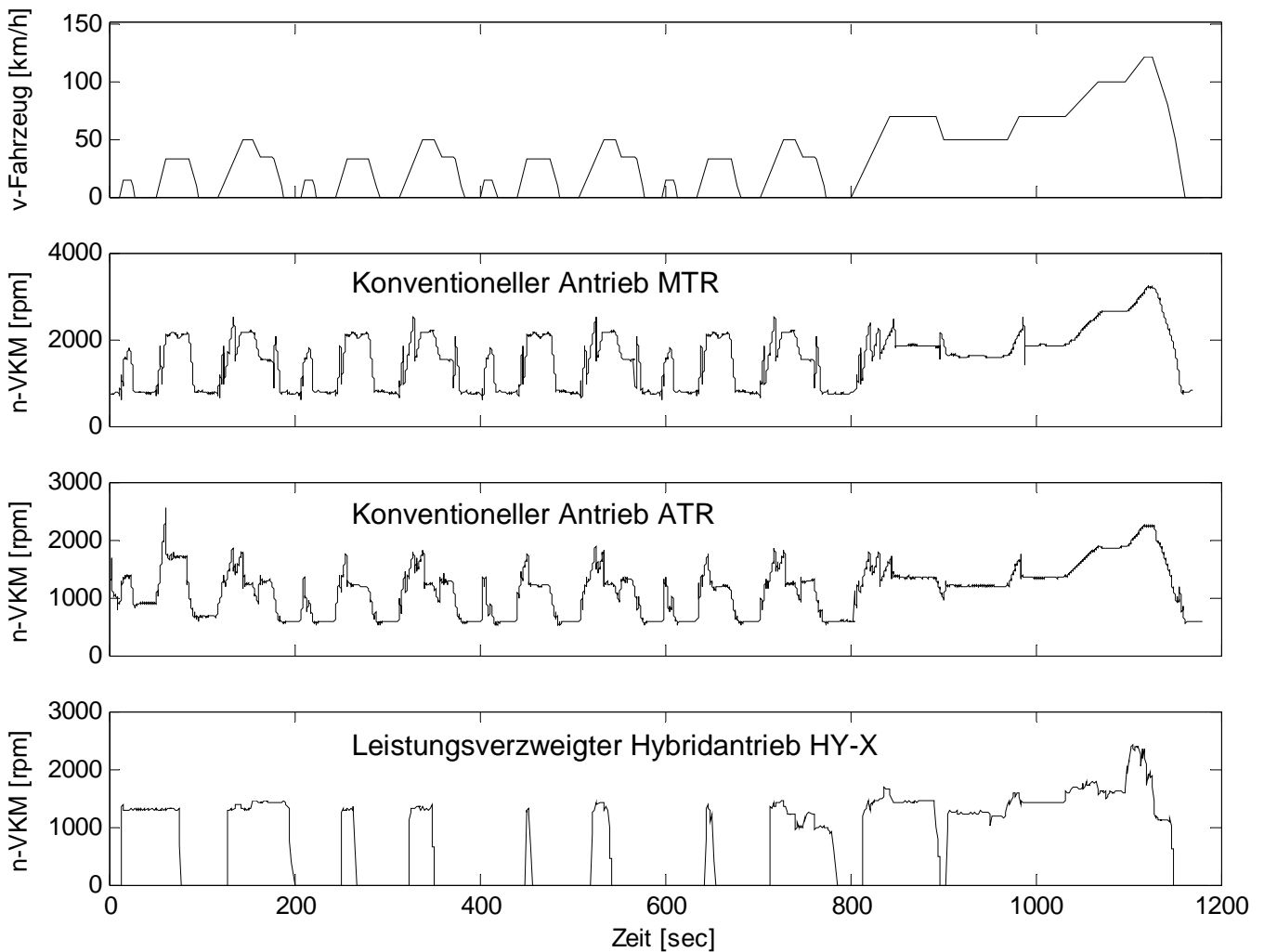


Bild 3: Drehzahlverläufe von Verbrennungsmotoren im NEFZ-Abgaszyklus

Im Rahmen einer umfangreichen Untersuchung wurde das Betriebsverhalten eines leistungsverzweigten Voll-Hybridkonzeptes am Beispiel des Lexus RX 400h analysiert [1]. Dabei wird der erste Elektromotor (Motor-Generator MG1) als Drehmomentstütze am zentralen Planetenradsatz verwendet und bewirkt somit eine stufenlose Übersetzungsfunktion. Die anfallende elektrische Energie sowie die Leistung der Batterie werden vom zweiten Elektromotor (MG2) in mechanische Abtriebsleistung gewandelt. Zur Darstellung des Betriebsverhaltens des Verbrennungsmotors ist in Bild 4 die Drehzahl über der Fahrzeuggeschwindigkeit aufgetragen. Zusätzlich sind die Drehzahlbereiche des Motor-Generators MG1 dargestellt. Die Betriebsgrenzen des Verbrennungsmotors ergeben sich aus der minimalen und maximalen Motordrehzahl, der maximalen Drehzahl des MG1 sowie der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit. Diese wird durch die maximale Drehzahl des Motor-Generators MG2 begrenzt. Die im praktischen Fahrversuch ermittelten Drehzahlbereiche sind beispielhaft für Stadt-, Überland- und Autobahnzyklen dargestellt.

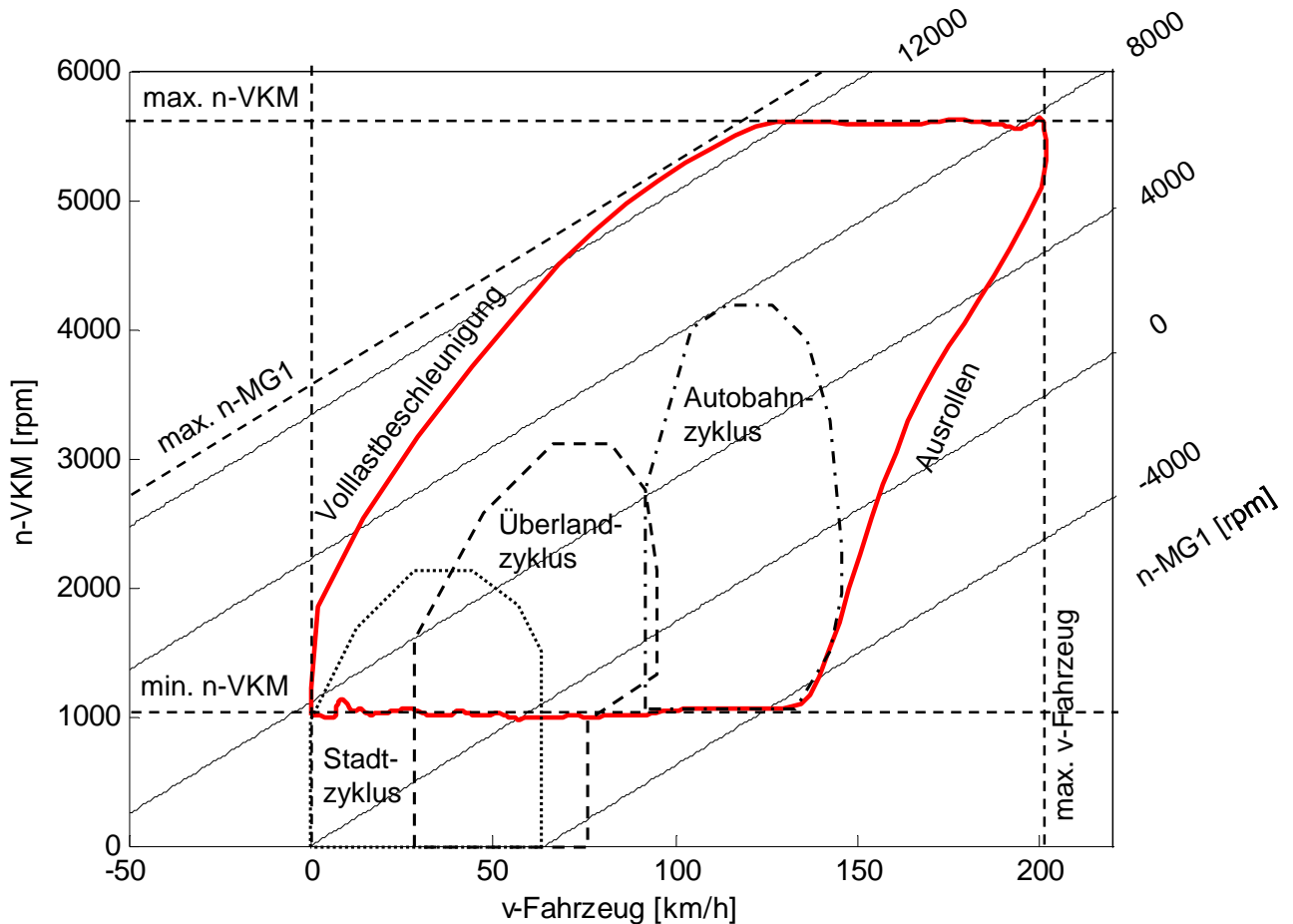


Bild 4: Betriebsbereiche des Verbrennungsmotors am Beispiel Lexus RX400h

Die für die jeweilige Fahrsituation optimalen Drehzahlbereiche für Verbrennungsmotor und Elektromotoren werden durch die Hybrid Control Unit berechnet und entsprechend angefahren. In Bild 4 ist am Beispiel einer Vollastbeschleunigung und anschließendem Ausrollen die Drehzahlregelung des Verbrennungsmotors durch den MG1 ersichtlich. Zur Ausnutzung des vollen Potentials des leistungsverzweigten Antriebsstrangs ist die sorgfältige Abstimmung des Motorstart- und Motorstoppvorgangs notwendig. In Bild 5 ist beispielhaft für eine Konstantfahrt mit 30 km/h und zyklischem Start/Stop die gemessene Temperatur vor Kat und die NO_x-Konzentration für einen Motor aus einem konventionellen Antriebsstrang dargestellt. Während beim konventionellen Motor wie zu erwarten deutliche Spitzen in der NO_x-Konzentration gemessen nach dem Katalysator bei jedem Startvorgang von 0 rpm auf 1200 rpm auftreten, ist bei einem optimierten Motor wie dem Lexus RX400h kein messbarer NO_x-Durchbruch mehr vorhanden.

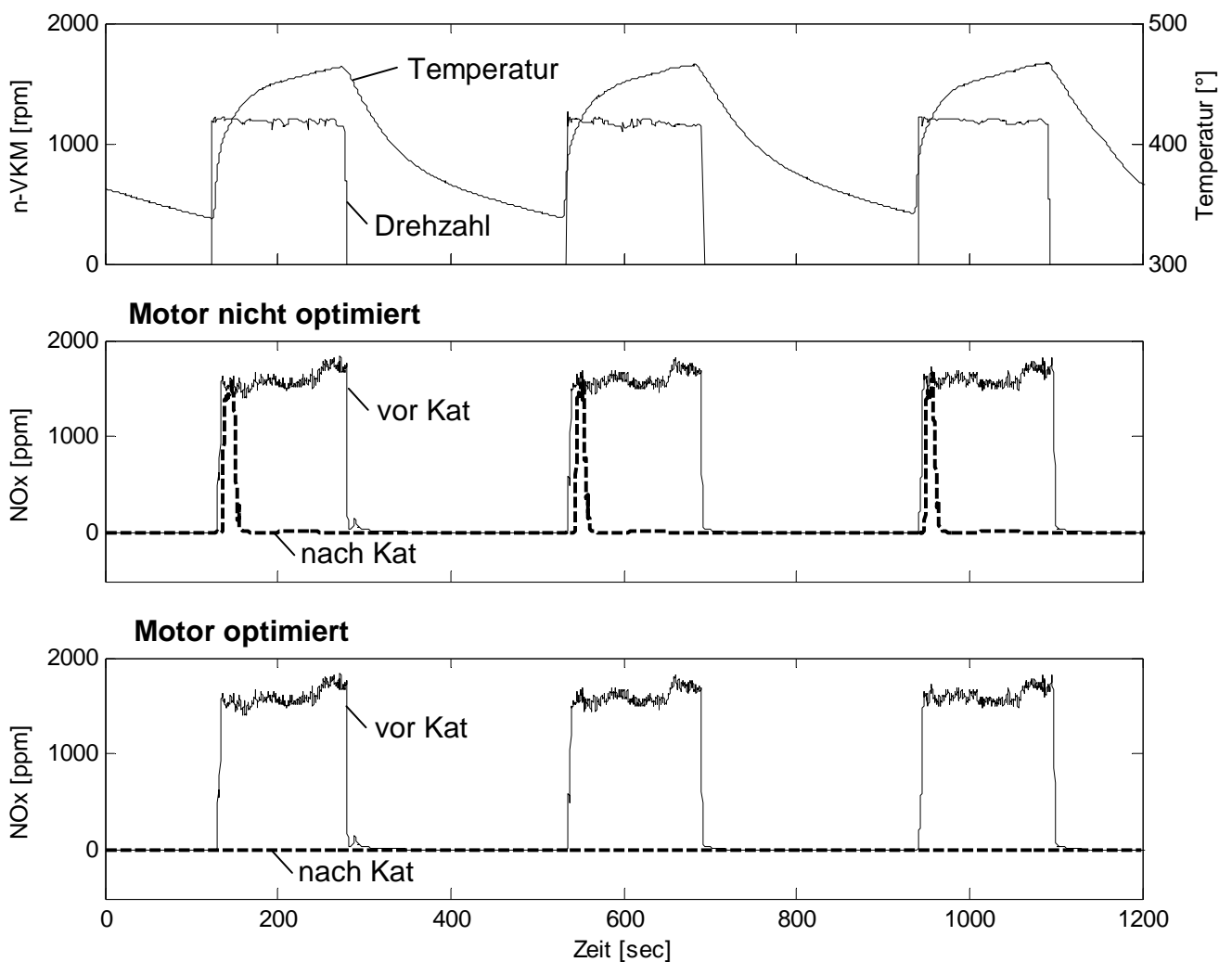


Bild 5: Motorabstimmung bei Start/Stop

Aus den speziellen Betriebsbedingungen von Verbrennungsmotoren in Hybridfahrzeugen ergeben sich folgende Anforderungen an die eingesetzten Motorprüfstände:

- Die im Fahrzeug durch Kupplungen und/oder Planetengetriebe erzeugte Drehzahl-
dynamik sowie spezielle Regelungsfunktionen wie z.B. die Winkellageregelung des
Verbrennungsmotors bei Start/Stop durch den Elektromotor sind so realistisch wie
möglich am Prüfstand abzubilden.
- Die Eigenfrequenzen des Prüfstands bedingt durch das Trägheitsmoment des
Belastungsaggregats und die Steifigkeit und Dämpfung der Prüfstandswelle dürfen keinen
merkbareren Einfluss mehr auf den dynamischen Motorbetrieb am Prüfstand haben.
- Alle für das Motorverhalten relevanten Funktionen der restlichen Steuergeräte im
Fahrzeug (HCU, TCU, ESP) sind am Prüfstand zu integrieren.
- Das dynamische Verhalten des am Motorprüfstand nicht vorhandenen Antriebsstrangs
sowie des Fahrwerks und Fahrzeugchassis sind in entsprechender Güte in Echtzeit zu
simulieren. Dabei sind auch kritische Fahrsituationen im Grenzbereich wie z.B.
Vollastbeschleunigung oder Anhängerbetrieb mit Schlupfregelung und Zuschalten der
elektrisch angetriebenen Hinterachse darzustellen.

4. Durchgängige Prüfstandsgebung im Entwicklungsprozess

Als Teil eines effizienten Fahrzeug-Entwicklungsprozesses ist es sinnvoll, eine durchgängige
modellbasierte Prüfstandsgebung aufzubauen. Der Schwerpunkt liegt hierbei in der
Durchgängigkeit der eingesetzten Simulationsmodelle [2] und Optimierungswerkzeuge [3]. In
Bild 6 ist eine solche Prüfkette für hybride Antriebsstränge dargestellt. Während der
Steuergeräteprüfstand die größte Flexibilität ermöglicht, bietet der Fahrzeug-Rollenprüfstand
die höchste Abbildungsgüte des Gesamtfahrzeugs.

Am Steuergeräteprüfstand werden einzelne oder mehrere Steuergeräte als reale
Komponenten aufgebaut und das restliche Fahrzeug in Echtzeit simuliert. Die Schwerpunkte
liegen hier in den Motor-, Getriebe-, Fahrdynamik- und Fahrassistenzfunktionen. Am
Motorprüfstand wird der reale Verbrennungsmotor mit ECU aufgebaut, die restlichen
Steuergeräte werden emuliert, d.h. die in den Steuergeräten enthaltenen Softwarefunktionen
nachgebildet, oder als ausführbarer und gegebenenfalls geschützter Code in die Simulation
am Prüfstand integriert. Weitere Komponentenprüfstände für z.B. Kupplungen, Getriebe oder
Batterien erlauben die Belastung der einzelnen Antriebsstrangmodule und ihrer Steuer-
geräte unter Leistungsbedingungen.

Der Schwerpunkt der Systemprüfstände wie Powerpack- und Powertrainprüfstand liegt in der Erprobung und Optimierung des Zusammenwirkens der verbrennungsmotorischen und elektrischen Aggregate im Antriebsstrang. Am Rollenprüfstand wird das integrierte Gesamtfahrzeug unter reproduzierbaren Bedingungen geprüft.

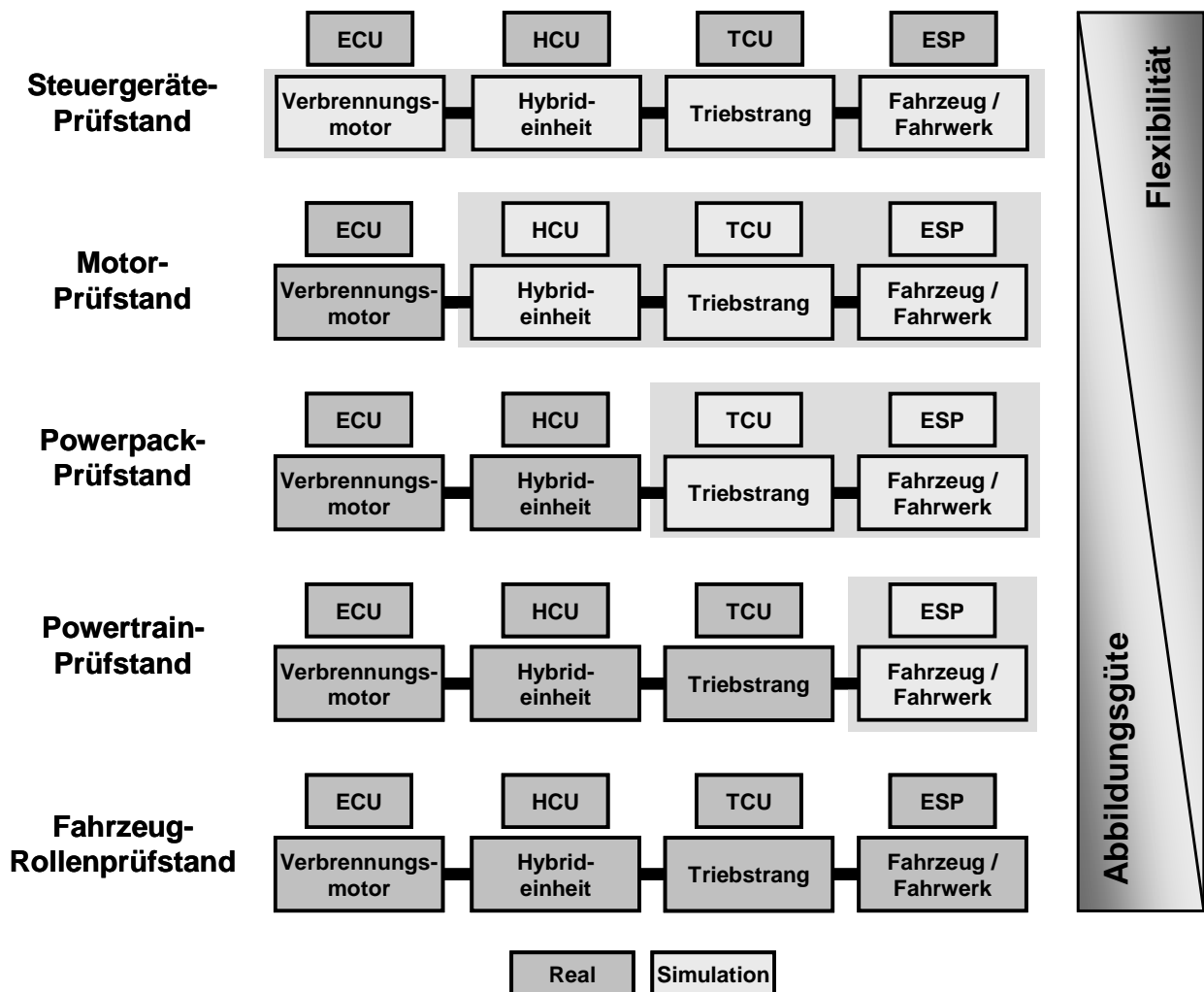


Bild 6: Durchgängige Prüfstandsumgebung für Hybridfahrzeuge

Eine Besonderheit der Leistungsprüfstände für Hybridfahrzeuge ist die Anforderung, die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs mit sehr hoher Genauigkeit durch hochdynamische Belastungsaggregate darzustellen. Insbesondere eine realistische Simulation des Schlupfverhaltens der angetriebenen Räder ist für die korrekte Funktion des Energie- und Dynamikmanagements der einzelnen Steuergeräte erforderlich. Dabei sind aus dem Simulationsmodell die entsprechenden Sensorsignale wie z.B. Raddrehzahl, Beschleunigung oder Gierrate abzugreifen. Beispielhaft ist in Bild 7 das Simulationsmodell eines leistungsverzweigten Hybridantriebs mit Allradfunktion dargestellt.

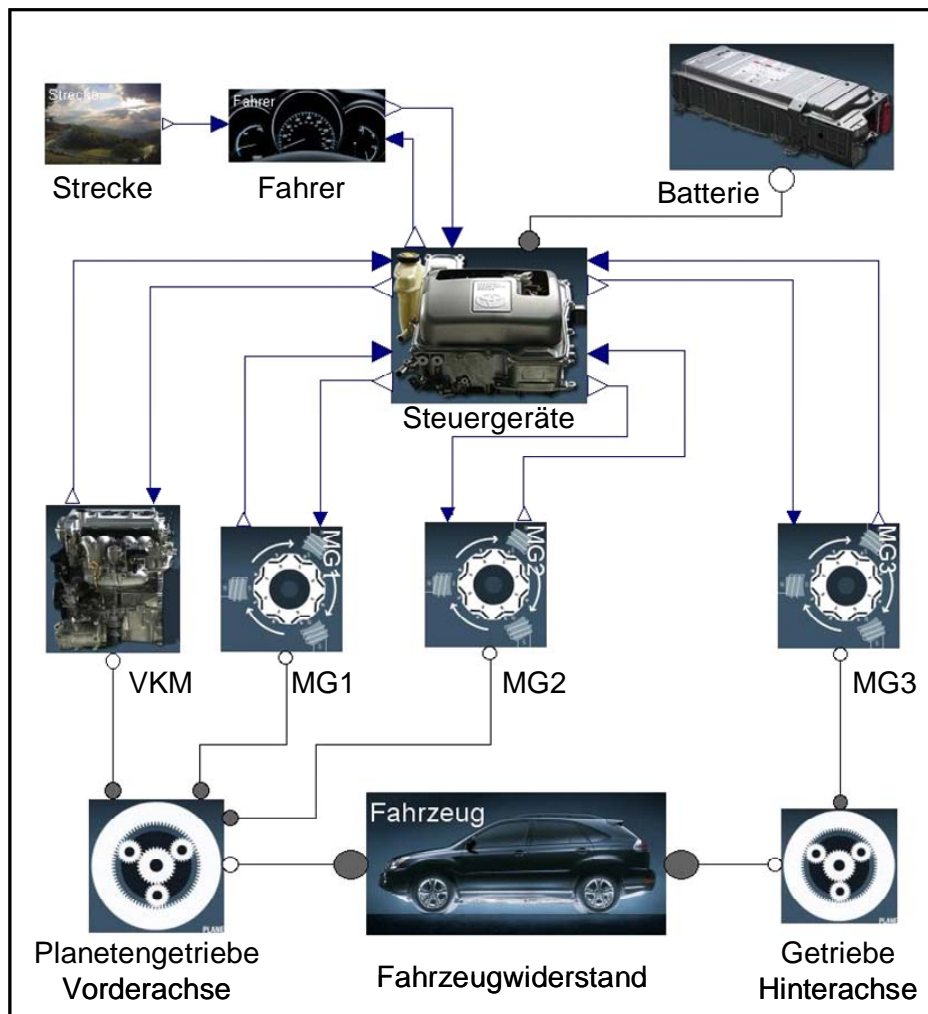


Bild 7: Simulationsmodell des Hybridfahrzeugs Lexus RX 400h

Zur Simulation des gesamten Hybridfahrzeugs sind folgende Module notwendig:

- Verbrennungsmotor (Wirkungsgrad, Verbrauch, Emissionen)
- Elektromotoren (Wirkungsgrad, Frequenzumrichter)
- Batterie (DC/DC Wandler)
- Kupplung (bei Mild-Hybrid und Strong-Hybrid mit Leistungsverzweigung)
- Getriebe (Automatisierte Schaltgetriebe, CVT und Planetengetriebe)
- Differenzial
- Rad-Boden Kontakt
- Fahrwerk und Chassis
- Steuergeräte (ECU, HCU, TCU, ESP, Fahrerassistenz)

5. Lösungskonzept am Beispiel dynamischer Motorprüfstand

Dem dynamischen Motorprüfstand kommt seit langem im Fahrzeug-Entwicklungsprozess eine besondere Bedeutung zu, da er die Abstimmung der komplexen thermodynamischen Abläufe unter reproduzierbaren Bedingungen bei gleichzeitig gutem messtechnischem Zugang ermöglicht [4].

Während beim konventionellen Motorprüfstand der kritische Bereich zwischen Start- und Leerlaufdrehzahl möglichst rasch zu durchfahren ist, wird nun der Betriebsbereich des Prüfstands für Hybridfahrzeuge bis Drehzahl Null ausgeweitet. Daher sind die Einflüsse der Eigenfrequenz der Prüfstandsmechanik durch geeignete Maßnahmen wie kleine Rotormasse und steife Ankopplung des Belastungsaggregats zu minimieren. Wie in Bild 8 dargestellt besteht eine Lösung darin, das Belastungsaggregat direkt an den Motor drehsteif anzuf lanschen anstatt wie bei konventionellen Prüfständen über eine weiche Prüfstandswelle zu verbinden. Die Lagerung von Motor und Belastungsaggregat erfolgt auf einem gemeinsamen Zwischenrahmen.

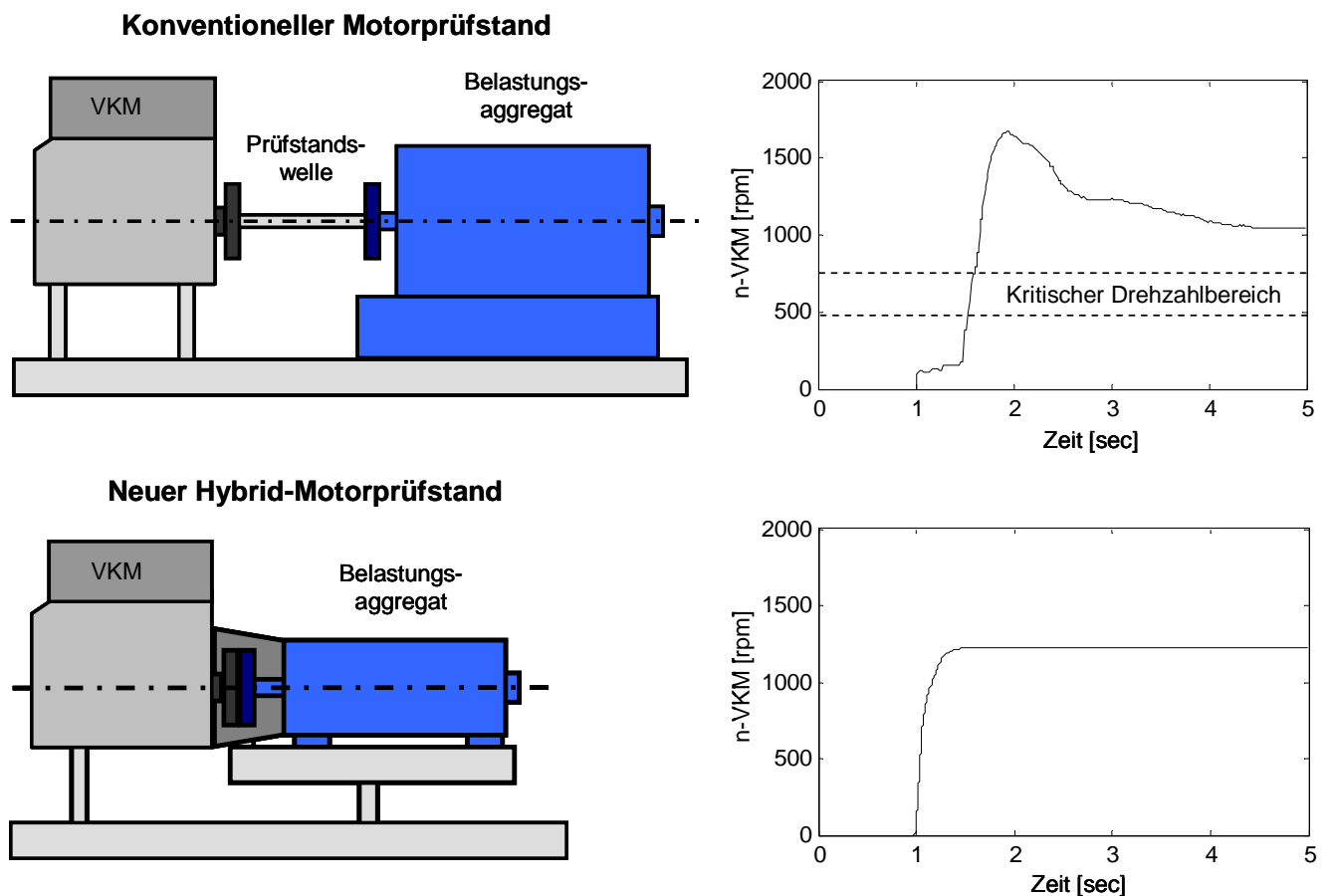


Bild 8: Mechanischer Aufbau von Motorprüfständen

Als weitere neue Aufgabe steht auch die ECU-Abstimmung mit hybridspezifischen Algorithmen an. Im Sinne eines konsequenten „Frontloading“, d.h. dem Vorziehen von Aktivitäten in frühe Phasen des Entwicklungsprozesses, wird vor dem Aufbau bzw. Einsatz des realen Prüfstands dessen Funktion durch einen „virtuellen Motorprüfstand“ abgesichert. Dabei werden die informationsverarbeitenden Komponenten wie die ECU, das Automatisierungs- und das Optimierungssystem mit einem auf dem Regelungs- und Simulationssystem implementierten Echtzeitmodell von Motormechanik und Prüfstand verbunden. Das Ziel des Aufbaus ist es, bereits vor Verfügbarkeit der realen Motormechanik die geforderten Optimierungs- und Validierungsfunktionen aufzusetzen und virtuell zu testen.

Danach wird das Modell durch den realen Motor und Prüfstand ersetzt und die Prüfläufe durchgeführt. Bei dem in Bild 9 dargestellten Prüfstands Aufbau wird die reale ECU über das entsprechende Fahrzeug-Bussystem mit den am Regelungs- und Simulationssystem implementierten restlichen Steuergerätefunktionen vernetzt. Das Verhalten der simulierten Fahrzeugkomponenten wie Hybrideinheit, Triebstrang, Fahrwerk und Chassis wird durch den elektrischen Umrichter des Belastungsaggregates in entsprechende Lastzustände umgesetzt.

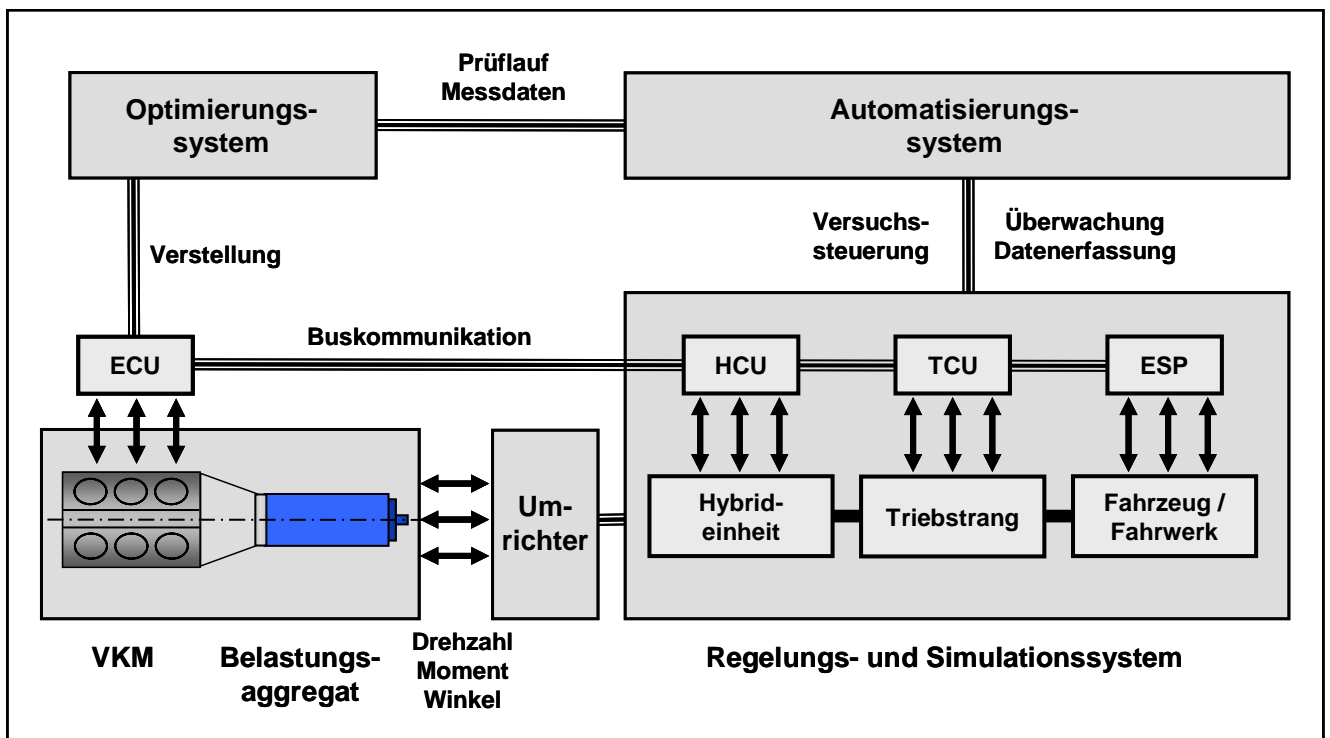


Bild 9: Simulation am Motorprüfstand für Hybridfahrzeuge

6. Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf einer Analyse des Verbrennungsmotorbetriebs im Fahrzeug wurden folgende Anforderungen an Motorprüfstände für Hybridantriebe abgeleitet:

- Die für die optimale Abstimmung des Motors kritischen Fahrsituationen wie Start/Stop und Mode-Shift sind am Prüfstand gleichwertig zum Fahrzeug darzustellen. Dazu sind Änderungen in der Sensorik und Regelung (z.B. Winkellageregelung), in der Dynamik des Belastungsaggregats sowie im mechanischen Prüfstandsaufbau notwendig.
- Um den Motor fahrzeugnahe am Prüfstand zu betreiben, sind echtzeitfähige Simulationsmodelle der Komponenten des hybriden Antriebsstrangs erforderlich. Insbesondere die Funktionen der am Motorprüfstand nicht vorhandenen Steuergeräte sind abzubilden. Die Einflüsse der Fahrdynamik wie z.B. der Reifenschlupf sind am Prüfstand in hoher Güte zu simulieren.
- Die Entwicklungswerkzeuge auf den Prüfständen sind für eine domänenübergreifende Optimierung bzw. Applikation der mechanischen, elektrischen, thermischen und informationsverarbeitenden Komponenten des Hybridfahrzeugs auszulegen.

Die unterschiedlichen Hybridkonzepte sind damit in Zukunft nicht nur Technologieträger der Fahrzeughersteller, sondern erfordern auch neue innovative Entwicklungswerkzeuge im Bereich der Simulations- und Prüfstandstechnik.

Literatur

- [1] Hohenberg, G.; Indra, F.: Theorie und Praxis des Hybridantriebs am Beispiel Lexus RX 400h. In: 27. Internationales Wiener Motorensymposium (Wien 2006)
- [2] Schyr, C.: Modellbasierte Methoden für die Validierungsphase im Produktentwicklungsprozess mechatronischer Systeme am Beispiel der Antriebsstrangentwicklung. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [3] Gschweitl, K.; Beidl, C.; Martini, E.; Christ, C.: Erfolgsfaktoren nachhaltiger Produktivitätssteigerung - Die durchgängige AVL Entwicklungsplattform. In: 1. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik (Wiesbaden 2005)
- [4] Hohenberg, G.: Dynamische Prüfung von Kfz-Antrieben - eine Standortbestimmung. In: VDI (Hrsg.): Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau (Fellbach 1988). Düsseldorf : VDI-Verlag, 1988 (VDI-Berichte 681)