

VERFASST VON



**Maximilian Stumpp, M. Sc.**

ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe (vkm) der TU Darmstadt.



**Alexander Kuznik, M. Sc.**

ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe (vkm) der TU Darmstadt.

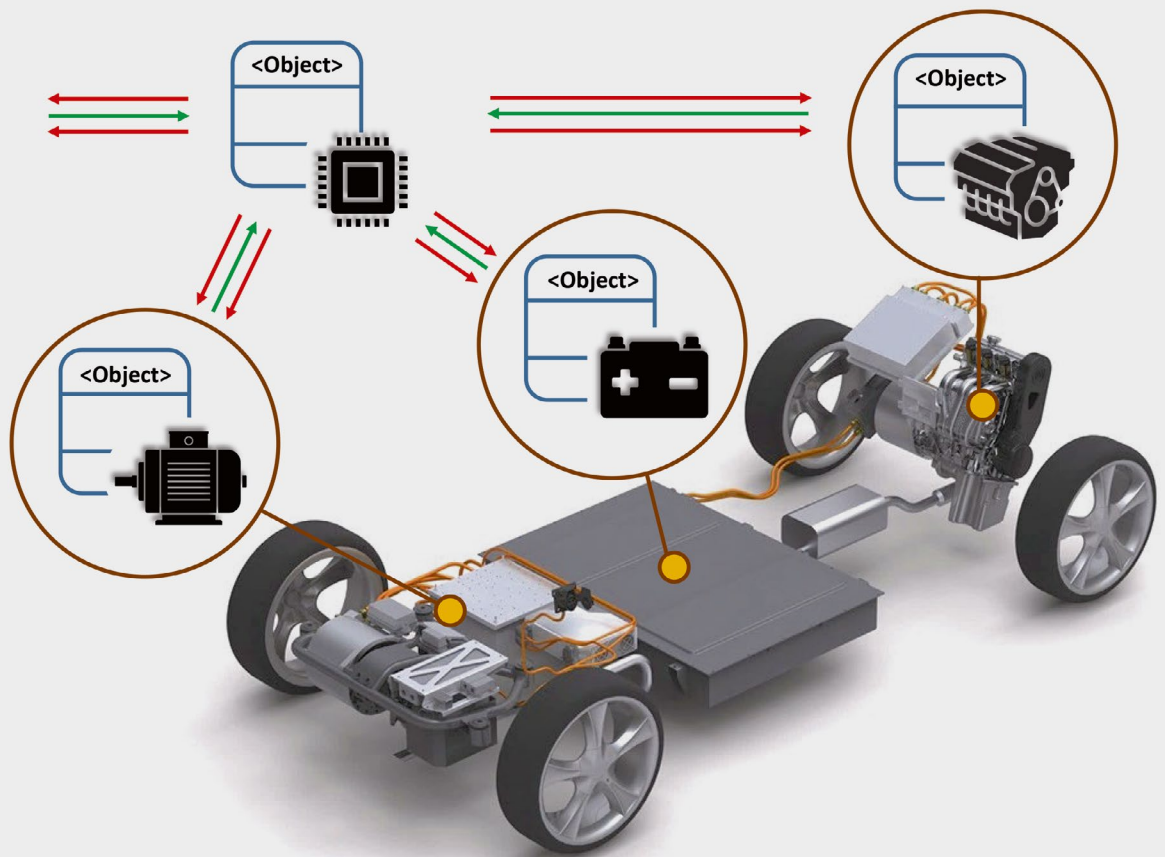


**Prof. Dr. Christian Beidl**

ist Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe (vkm) der TU Darmstadt.

# Modulare objektorientierte Architekturen für skalierbare Hybridantriebsstränge

Objektorientierte Architekturen werden bereits in unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt, um Teilsysteme modular auszulegen und ihre Funktionalitäten und Interaktionen innerhalb des Systems skalieren zu können. Im FVV-Forschungsvorhaben Nr. 1428 „Modular Hybrid Powertrain“ wurden an der TU Darmstadt Gestaltungsprinzipien für objektorientierte Designs und deren Übertrag auf hybride Antriebsysteme und einzelne Komponenten erarbeitet. Dadurch ist ein Austausch der Komponenten und Konfigurationen zur Erzeugung von Varianten möglich, ohne den Entwicklungsaufwand zu vergrößern.



© TUD

1	FLEXIBLE ARCHITEKTUREN
2	PRINZIPIEN
3	OBJEKTORIENTIERTES DESIGN DES ANTRIEBSSTRANGS
4	IMPLEMENTIERUNG UND VERIFIKATION
5	ZUSAMMENFASSUNG

## 1 FLEXIBLE ARCHITEKTUREN

Für zukünftige Fahrzeugplattformen wird eine Vielfalt an unterschiedlichen Antriebsstrangkonfigurationen erwartet – der Trend drückt sich heute schon in Mildhybridfahrzeugen (Mild Hybrid Electric Vehicles, Mild-HEVs), Vollhybridfahrzeugen (Full-HEVs) und batterieelektrischen Fahrzeugen (Battery Electric Vehicles, BEVs) aus. Modulare Baukastensysteme sind bereits weitflächig im Einsatz, um die Produktionskosten zu senken und die Lieferketten zu vereinfachen. Ein und dieselbe Komponente wird in verschiedenen Fahrzeugvarianten eingesetzt. Dem geht ein hoher Entwicklungsaufwand in Bezug auf die Applikationen jeder Variante voraus, der auf der Komplexität und den hohen Abhängigkeiten der Teilsysteme untereinander beruht. Eine Geschwindigkeitsregelanlage berechnet das Antriebs- beziehungsweise Bremsmoment, um eine gewünschte Geschwindigkeit zu erreichen oder zu halten, auf Grundlage der Eigenschaften und der Physik der mit ihr ausgestatteten Fahrzeugvariante. Wird nur eine Komponente für eine andere Variante geändert, muss die Regelanlage mit neuen Parametern angepasst werden.

In der Informationstechnologie wird nach den Prinzipien des Objektorientierten Designs (OODs) entwickelt und bietet dadurch Flexibilität bei dem Austausch oder der Erweiterung von Funktionalitäten. Die Prinzipien sind nicht nur auf Software beschränkt,

sondern lassen sich auch auf Hardwareelemente ausweiten und übertragen [1]. Die Interaktion zwischen einem Computer und einem Drucker kann beispielhaft genannt werden.

Ziel des FVV-Forschungsvorhabens, das am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeuantriebe (vkm) der TU Darmstadt durchgeführt wurde, ist es, für die Entwicklung von Antriebssträngen mit einer Vielfalt von Komponenten, die gleiche Flexibilität zu erreichen, **BILD 1**. Hierzu werden objektorientierte Architekturen eingeführt und Interaktionen der Komponenten mittels standardisierter Schnittstellen ausgelegt. Die Verifikation der Architektur erfolgt dabei simulationsbasiert.

## 2 PRINZIPIEN

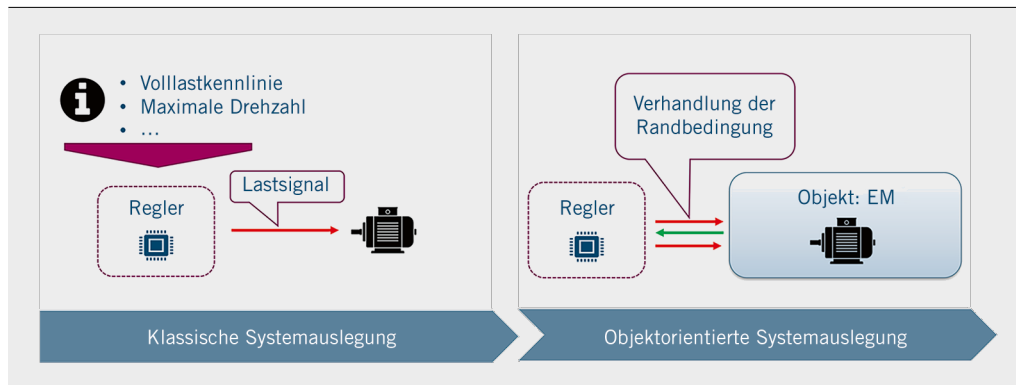
In der Entwicklung einer OOD-basierten Systemarchitektur wird wie folgt vorgegangen [2]:

- Abstraktion und Definition von Objekten
  - Einhaltung einer konsequenten Kapselung (Entkoppelung von Funktionen)
  - Auslegung der Schnittstellen nach dem Entwicklungsprinzip des Entwurfs gemäß Vertrag (Design by Contract)
  - Erschaffung einer skalierbaren und gleichzeitig robusten Lösung.
- Den wesentlichen Unterschied von bisherigen Systemarchitekturen zum OOD zeigt **BILD 2** anhand der Kommunikation eines Reglers mit einem Elektromotor (EM). Bisherige Systeme sind überwiegend als klassische Regelkreise ausgelegt, in dem der EM direkt über eine spezifische Lastanforderung angesteuert wird. Für die Berechnung des Lastsignals sind alle relevanten Informationen über den EM im Regler gespeichert, sodass die Randbedingungen a priori bekannt sein müssen.

Eine objektorientierte Systemauslegung basiert dagegen auf der Verhandlung von Randbedingungen, sodass alle Informationen der Komponente EM gekapselt in dem neu definierten Objekt „Elektromotor“ vorliegen. Die Entwicklung des Reglers kann somit unabhängig von den Spezifikationen des eingesetzten EMs erfolgen. Ein Objekt ist somit definiert als eine Hardware- oder



**BILD 1** Konzept des Übertrags von OOD-Prinzipien auf die Entwicklung hybrider Antriebssysteme (© TUD)



**BILD 2** Klassische versus objektorientierte Systemauslegung auf Basis von Verhandlungen (© TUD)

Softwarekomponente, die die Funktionalität und Charakteristika abstrahiert hat. Jedes Objekt verfügt über Attribute (beziehungsweise Parameter) und Funktionen, die öffentlich für andere Objekte aufrufbar sind [3].

Die Auslegung der Interaktion zwischen den Objekten ist ein entscheidender Faktor für die Verwirklichung einer vollständigen Modularität. Die grundlegende Kommunikationsform wird über das Design-by-Contract-Prinzip realisiert. Der Vertrag besteht darin, dass es zwischen zwei Objekten eine Verhandlung mit Anfragen und Antworten gibt. In **BILD 3** ist die Verhandlung in den drei Schritten dargestellt [3]:

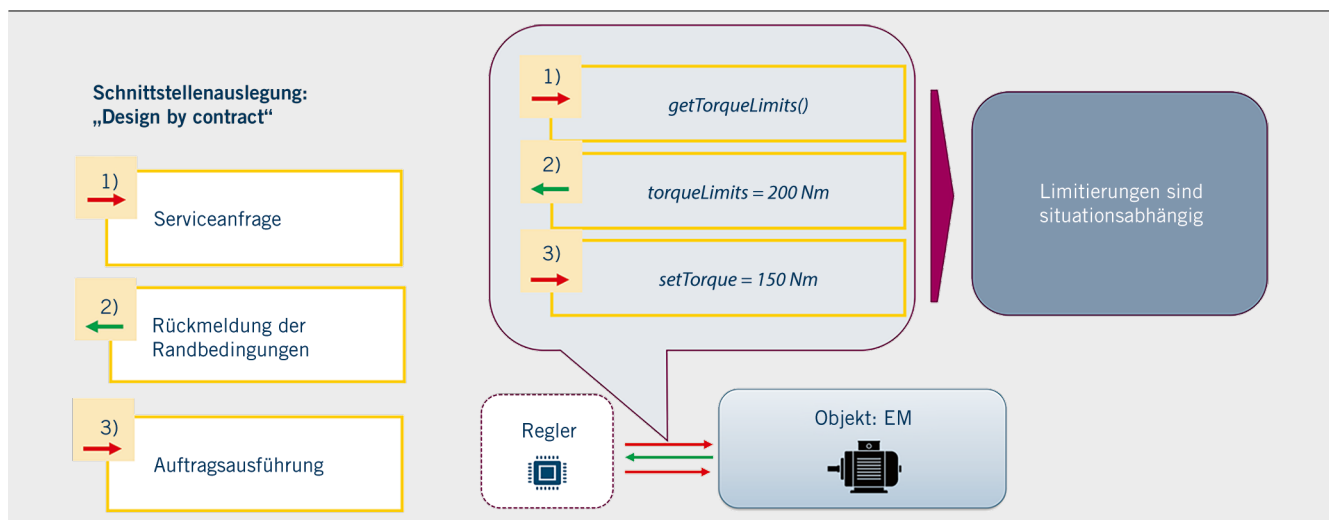
- Platzierung einer Serviceanfrage
- Rückmeldung der Randbedingungen
- Ausführung des Auftrags.

Für eine Drehmomentanfrage findet dabei der Austausch der maximal und minimal verfügbaren Drehmomente statt. Diese Randbedingungen gelten für den jeweilig angefragten Zeitpunkt und sind dabei situationsabhängig und dynamisch. Welche Informationen und Services jeweils angefragt werden können, muss über ein Protokoll als standardisierte Schnittstelle festgelegt werden. Das Protokoll beinhaltet außerdem die genauen Signalformen, Einheiten und Abfrageraten etc., was die unabhängige Entwicklung der jeweiligen Teilsysteme beziehungsweise Objekte ermöglicht.

### 3 OBJEKTORIENTIERTES DESIGN DES ANTRIEBSSTRANGS

Die Abstraktion des Systems umfasst die Analyse und die Untersuchung aller Komponenten und Funktionalitäten. Die Objekte der OOD-basierten Architektur werden dabei so gebildet, dass jeweils klare Hauptfunktionen zugeordnet werden können. In einem Hybridantrieb hat der EM analog zu einem Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine, ICE) die Hauptfunktion, das Drehmoment bereitzustellen. Die Objekte lassen sich nun über Attribute wie Volllastkennlinien spezifizieren. Bei näherer Systembetrachtung können bestimmte funktionelle Abhängigkeiten zwischen einzelnen Objekten festgestellt werden. Der EM benötigt die Batterie als Energiequelle. Da die Bereitstellung eines Drehmoments vom EM in dem betrachteten System immer auch mit einer Leistungsbereitstellung durch die Batterie einhergeht, können beide Objekte zu einem gemeinsamen Objekt „EM-Antrieb“ zugeordnet werden. Das erleichtert die Interaktion mit anderen Objekten, da die Kommunikation somit über ein Objekt abgewickelt werden kann. Analog dazu kann ein gemeinsames Objekt „ICE-Antrieb“ eingeführt werden, das den ICE mit dem Getriebe und der Kupplung zusammenfasst.

Eine weitere notwendige Abstraktion, die vorgenommen werden muss, ist die funktionelle Abstraktion zu hierarchischen Ebenen.



**BILD 3** Interaktion der Objekte mittels Verhandlungen auf Basis des Design by Contract (© TUD)

# EFFIZIENZ. ÖKONOMIE. MOBILITÄT.

**Sicher in die Zukunft** – die Herausforderung bei der Entwicklung von Mobilien Maschinen und Straßennutzfahrzeugen ist das Wissen von morgen mit Blick auf Technologien von übermorgen. Moderne Nutzfahrzeuge langfristig robust und kostengünstig bei einem hohen Wirkungsgrad zu betreiben, gewährleistet einen optimalen Investitionsschutz. ATZheavyduty bietet neuestes Wissen aus Forschung und Entwicklung und berichtet einzigartig über das gesamte Spektrum der Nutzfahrzeugtechnik auf und abseits der Straße. Nutzen Sie zusätzlich zu den Printausgaben das **interaktive E-Magazin** und profitieren Sie von der einzigartigen **Wissensdatenbank des Onlinearchivs mit pdf-Download**.

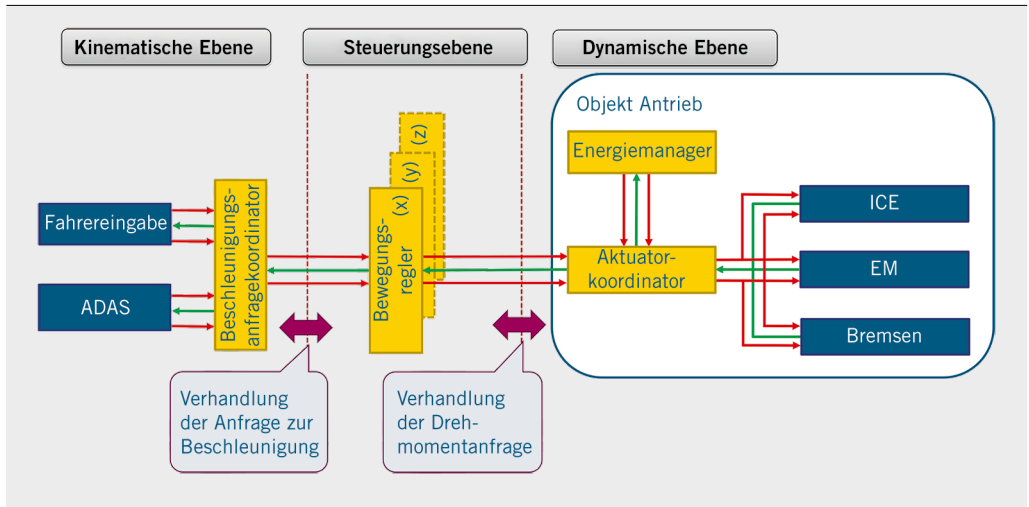
# ATZ heavyduty

ON- UND OFFHIGHWAY-NUTZFAHRZEUGE



[www.mein-fachwissen.de/ATZheavyduty](http://www.mein-fachwissen.de/ATZheavyduty)

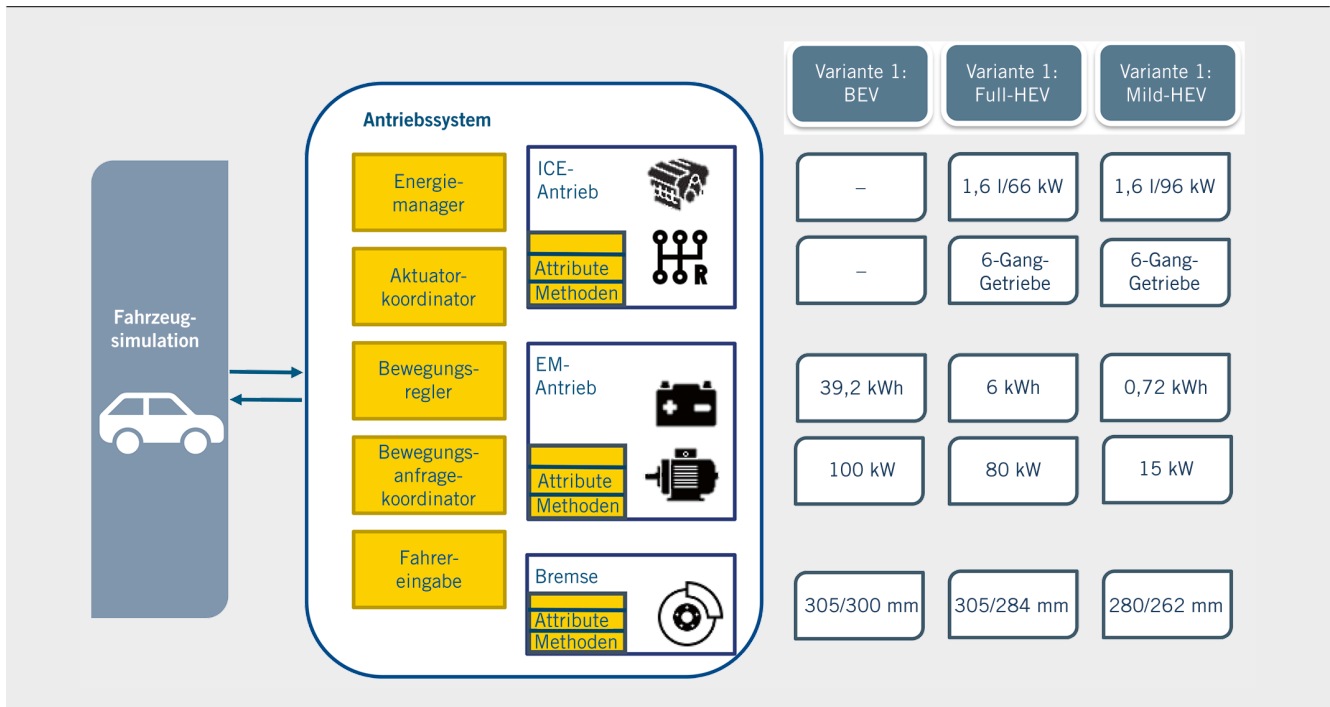
**BILD 4** Objektorientierte Architektur des Hybridantriebsstrangs (© TUD)



Die longitudinale Bewegung des Fahrzeugs wird in unterschiedlichen Abstraktionsebenen beschrieben. Zur grundlegenden Aufgabe des Antriebsstrangs gehört die Planung der Fahrzeugkinematik in Raum und Zeit. Diese Grundfunktion kann von Objekten übernommen werden, wozu der Fahrende, die Geschwindigkeitsregelanlage und weitere Fahrerassistenzsysteme (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) zählen. Damit eine konsequente Entkoppelung von den Funktionen der Aktuatorobjekte erfolgt, dürfen die Objekte auf der kinematischen Ebene nur Beschleunigungen anfragen. Aktuatorobjekte stellen Drehmomente bereit und sind damit für die Umsetzung der kinematischen Planung verantwortlich. Damit ergeben sich eine dynamische Ebene und eine Steuerungsebene für die Übersetzung der Beschleunigungs- in Drehmo-

mentanfragen. Dafür muss ein neues Objekt „Bewegungsregler“ eingeführt werden, das eine Drehmomentanfrage anhand der Fahrzeugmasse und des Beschleunigungswunschs berechnet.

In **BILD 4** ist die vollständige OOD-basierte Architektur dargestellt. Zu erkennen sind zwei weitere Objekte, die eingeführt werden müssen. Da in jeder Ebene mehrere Objekte mit derselben Hauptfunktionalität vorhanden sind, werden sogenannte Koordinatoren benötigt. Sie sind notwendig, um die Ebenen vollständig voneinander zu entkoppeln. Objekte in der kinematischen Ebene und der Steuerungsebene dürfen nicht von der Existenz einzelner Aktuatorobjekte abhängig sein. Das Objekt „Bewegungsregler“ sollte lediglich die gesamt verfügbaren maximalen und minimalen Momente erfragen. Für die Umsetzung auf der dynamischen Ebene



**BILD 5** Simulationsaufbau des OODs für drei Fahrzeugvarianten (© TUD)

ist das Objekt „Aktuator Koordinator“ zuständig. Es weiß um die Existenz der einzelnen Aktuatorobjekte und ist verantwortlich für die Priorisierung der Anfragen und die Aufteilung der Drehmomente. Für die Umsetzung einer energieoptimalen Drehmomentverteilung kann das Objekt „Aktuator Koordinator“ die Empfehlung in Form von Wunschvorgaben des ebenfalls neu definierten Objekts „Energiemanager“ heranziehen. Wichtig ist, dass die endgültige Entscheidung über die Verteilung der Drehmomente beim „Aktuator Koordinator“ liegt. Auf der kinematischen Ebene ist ebenfalls ein Koordinator notwendig. Das Objekt „Beschleunigungsanfrage Koordinator“ hat die Aufgabe, zu priorisieren und mit dem Objekt „Bewegungsregler“ zu verhandeln.

#### 4 IMPLEMENTIERUNG UND VERIFIKATION

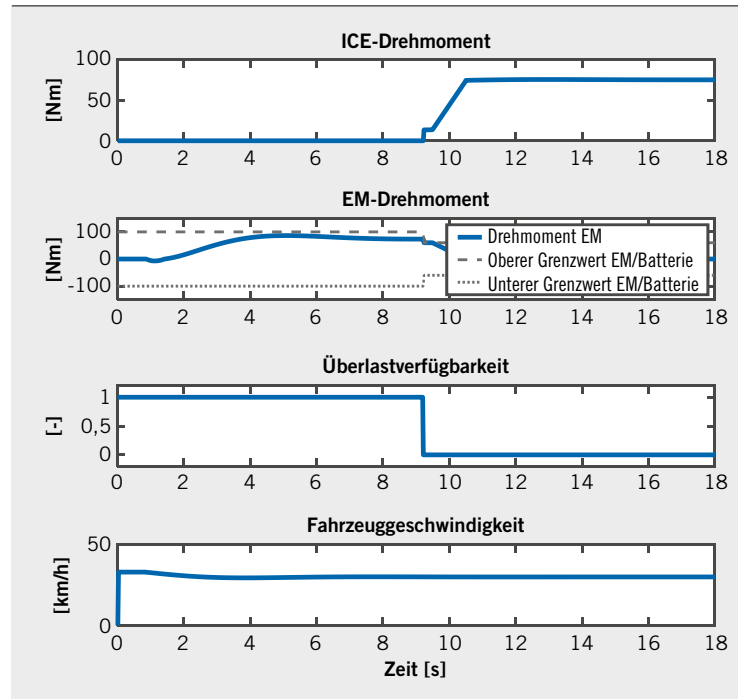
Die Umsetzung und Verifikation der OOD-basierten Architektur findet in einer Simulationsumgebung statt. Die Objekte sind in Matlab/Simulink modelliert, **BILD 5**. Klassische Komponentenmodelle sind dabei zu Objekten abstrahiert und entsprechend über Attribute und Methoden definiert. Der Fahrende, das restliche Fahrzeug, die virtuelle Umgebung sowie die Fahrstrecke sind in IPG CarMaker abgebildet. Die Verifikation des entwickelten Ansatzes erfolgt durch die Skalierung oder den Austausch der entsprechenden Aktuatorobjekte, wobei drei Fahrzeugvarianten konfiguriert sind.

Die Funktionsfähigkeit der vollständigen Modularität wird durch Einführung neuer Technologien als neue Objekte und die Systemreaktion auf das Grenzverhalten einzelner Objekte gezeigt, zum Beispiel der untere und obere Ladezustand der Batterie. Des Weiteren ist die Integration eines neuen Objekts am Beispiel des elektrisch beheizten Katalysators dargelegt und wie die Interaktion im Gesamtsystem objektorientiert umgesetzt werden kann.

Hier sei ein ausgewähltes Anwendungsbeispiel beschrieben: die Interaktion der Objekte bei dem Austausch der EM mit einer überlastfähigen Maschine in einem 48-V-Hybridfahrzeug bei einer Bergauffahrt mit konstanter Geschwindigkeit. **BILD 6** zeigt, dass die Drehmomentanforderung die Nennleistung des EMs überschreitet, der dem Objekt „Aktuator Koordinator“ die maximalen und minimalen Drehmomente im Überlastbetrieb übermittelt. Die maximale Dauer der Überlast ist nach 6 s erreicht, sodass das Objekt „EM-Antrieb“ geringere Drehmomentgrenzwerte meldet. Als Reaktion auf den Fahrerwunsch und den geänderten Randbedingungen entscheidet das Objekt „Aktuator Koordinator“ auf Empfehlung des Objekts „Energiemanager“ die ICE zu starten. Durch die OOD-Architektur kann die Regelung des Fahrzeugs flexibel mit unterschiedlichen Randbedingungen des EM-Betriebs umgehen, ohne darauf explizit appliziert zu sein.

#### 5 ZUSAMMENFASSUNG

Als Ergebnis des Forschungsvorhabens wurde eine vollständig modulare Architektur nach OOD-Prinzipien entwickelt. Es zeigt sich, dass vorhandene Komponentenmodelle und Regler als Objekte mit Attributen und Methoden definiert werden können und eine Kommunikation mittels Design by Contract möglich ist. Eine strukturierte Einteilung in eine kinematische und dynamische Ebene ist für die Entkoppelung genauso notwendig wie die Einführung neuer Koordinatorobjekte. Die Koordinatoren spielen eine entscheidende Rolle, da sie die zentralen Schnittstellen in den jeweiligen Ebenen bilden. Weitere Objekte wie der „Energiemanager“ können als beratende Objekte Drehmomentempfehlungen



**BILD 6** Drehmomentaufteilung mit in Überlast betriebenem EM (© TUD)

kommunizieren, dürfen allerdings nie eine direkte Ansteuerung der Aktuatoren ausführen. Die Architektur ist in eine Simulationsumgebung übertragen und anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele validiert worden. Es zeigt sich, dass Fahrzeugkonfigurationen durch die Skalierung einzelner Objekte funktionsfähig erstellt werden können. Des Weiteren können neue Technologien in die Objekte integriert werden, ohne dass Anpassungen des Gesamtsystems vorgenommen werden müssen.

#### LITERATURHINWEISE

- [1] Martin, R. C.: Pearson new international edition. Agile software development, principles, patterns, and practices (1. Aufl.). Harlow: Pearson Education Limited, 2014
- [2] Held, V.; Heitmann, A.: Die Modularisierung der Fahrzeugregelsysteme durch Anwendung objektorientierter Entwurfsprinzipien. 8. Internationales Münchner Fahrwerk-Symposium, chassis.tech plus, München, 2017
- [3] Booch, G. et al.: Object-oriented analysis and design with applications (3. Aufl.). Upper Saddle River, N.J.: Addison-Wesley, 2007

## DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Projektnr. 1428) wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe (vkm) der Technischen Universität Darmstadt unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr. techn. Christian Beidl durchgeführt. Es wurde von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr. Veit Held (ehemals Stellantis/Opel Automobile) und Dr.-Ing. Thomas Opitz Held (ehemals Stellantis/Opel Automobile) begleitet. Die Autoren bedanken sich beim Fördergeber FVV und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: [www.mtz-worldwide.com](http://www.mtz-worldwide.com)

# Get the spirit!

**Perfekt!**  
Für Vertriebsingenieure  
der Automobilbranche.

**Starten Sie durch und sichern Sie sich die Basis für Ihren Erfolg.**

Sales Excellence ist die führende Plattform für Vertriebsexperten und bietet innovative Techniken für erfolgreiche Spitzenreiter, die die Chancen und Herausforderungen im Vertrieb der Gegenwart und der Zukunft im Blick haben. Nutzen Sie die gesamten Potenziale von Print, E-Magazin und dem umfassenden Online-Archiv.



**Jetzt kostenlos testen!**



© istockphoto.com/antoniokhr

[www.meinfachwissen.de/SLX](http://www.meinfachwissen.de/SLX)