



Elektrifizierung für eine nachhaltige Mobilität –
Entwicklung der vierten Generation des Toyota Prius

E-volutions sprung

Der Toyota Prius ist der weltweit anerkannte Hybrid-Pionier. Um die Effizienz der Fahrzeuge signifikant zu steigern, nahm Toyota eine ganzheitliche Optimierung der Entwicklung vor. Dazu wurde auch eine neue modellbasierte Werkzeugkette mit dem Seriercode-Generator TargetLink von dSPACE und den Testlösungen der Firma BTC Embedded Systems eingeführt.



Wie lässt sich Mobilität erhalten, ohne dass der Verkehr langfristig Mensch und Umwelt übermäßig belastet? Diese Frage steht im Mittelpunkt einer nachhaltigen Mobilität, die ein wesentliches Entwicklungsziel von Toyota ist. Was das konkret bedeutet, zeigt der neue Prius, bei dem es gelang, die Kraftstoffeffizienz im Testzyklus JC08 auf bis zu 40,8 km/l bzw. umgerechnet 2,45 Liter pro 100 km zu verbessern. Gleichzeitig wurde auch die Antriebsleistung optimiert, um ein dynamischeres Fahrverhalten zu gewährleisten.

Evolutionssprung beim Prius 4

Das Antriebskonzept des Fahrzeugs setzt auf eine einzigartige Kombination von Seriell- und Parallelhybrid. Grundlage dafür ist ein Planetengetriebe, das sogenannte Power Split Device (PSD), das den Verbrennungsmotor und zwei Elektromotoren koppelt. So lassen sich rein elektrischer Fahrbetrieb, Rekuperation sowie serieller und paralleler Betrieb von Elektro- und Verbrennungsmotor realisieren. Darüber hinaus dient das PSD auch als stufenloses Getriebe. Das Antriebssystem ist Bestandteil von Toyotas neuer modularer Automobilplattform TNGA (Toyota New Global Architecture), auf der zukünftige Modelle von Lexus und Toyota aufbauen. Im Zuge der Einführung der Plattform erfolgte eine grundlegende Überarbeitung aller beteiligten Komponenten. Dies führte zu beeindruckenden Ergebnissen beim Kraftstoffverbrauch: Bei der vierten Generation des Prius ließ sich die Kraftstoffeffizienz, bezogen auf die länderspezifischen Testfahrzyklen, in Japan um 26 %, in Europa um 20 % und in den USA um 14 % verbessern.

Optimierung der Steuerungsentwicklung

Bei der vierten Generation des Prius waren die Anforderungen an die Steuerung zur Steigerung der Fahr-

>>

zeugeffizienz im Vergleich zu den Vorgängermodellen deutlich höher. Daher kam der Optimierung der Steuerungsstruktur eine essentielle Rolle bei der Effizienzsteigerung zu. Damit die Größe der Bauteile reduziert und somit die Kraftstoffeffizienz erhöht werden konnte, musste zum Beispiel die Motorsteuerung besonders schnell ansprechen. Um unmittelbar für die neuen Anforderungen gerüstet zu sein und genügend Spielraum für zukünftige technische Innovationen zu haben, stellte Toyota die gesamte Steuerungsentwicklung auf den Prüfstand. Dabei wurden auch die Benutzerfreundlichkeit und Effizienz der Steuerungsarchitektur, des Entwicklungsprozesses und der Entwicklungswerkzeuge beurteilt.

Überarbeiten der Steuerungsstruktur

In einem ersten Schritt ging es darum,

die komplette Struktur der Steuerung grundlegend zu überarbeiten. Ziel war es, eine einfachere, verständlichere Struktur zu etablieren. Das verkürzt die Lernkurve von weniger erfahrenen Mitarbeitern, vereinfacht den Steuerungsentwurf und spart Zeit bei der Fehlersuche. Darüber hinaus konnte die Effizienz des Seriencodes durch die neue Steuerungsstruktur und die Code-Generierungswerkzeuge verbessert werden.

Überarbeiten des Entwicklungsprozesses

Ein effizienter Entwicklungsprozess basiert auf so vielen Entwicklungsschritten wie nötig und gewährleistet so viel Produktqualität wie möglich. Die Bewertung essentieller Abläufe des bisherigen Prozesses ergab, dass eine Reduktion von Entwicklungs-

schritten insbesondere durch den modellbasierten Entwurf zu erreichen ist, der die Implementierung eines Gesamtentwicklungsprozesses mit optimalen Werkzeugen und Zeiteinsparungen automatisiert. Ebenso wurde die Implementierung von Werkzeugen als Lösungsansatz für eine effizientere, ISO-26262-konforme Qualitätssicherung identifiziert. Darüber hinaus möchte Toyota neben dem herkömmlichen Prüfprozess in späteren Phasen des Entwicklungsprozesses produktiv mit Zulieferern zusammenarbeiten können.

Etablierung einer modellbasierten Werkzeugkette

Um den Entwicklungsprozess effizienter zu gestalten, setzt Toyota auf eine modellbasierte Werkzeugkette, die auf der Entwicklungsumgebung MATLAB®/Simulink® aufbaut. Aus den definierten Effizienzzielen ergaben sich präzise Anforderungen an die Werkzeuge, für die geeignete Kandidaten evaluiert wurden:

Verbesserung der Entwicklungseffizienz

Toyota entschied sich für den Seriene-Generator TargetLink® von dSPACE, der eine zuverlässige automatische Code-Generierung und ein durchgängiges Simulationskonzept vom Modell bis zum Objektcode bietet.

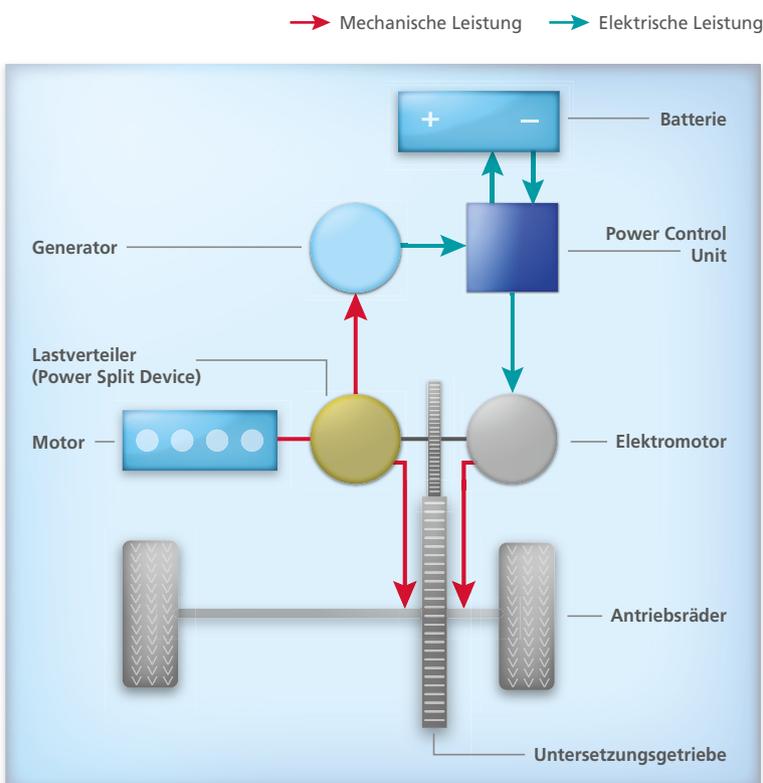
Qualitätssicherung bis zur Implementierung

Hierfür kamen die Testwerkzeuge BTC EmbeddedValidator und BTC EmbeddedTester der BTC Embedded Systems AG zum Einsatz. Mit ihnen lassen sich TargetLink-Modelle und generierter Code in frühen Entwicklungsphasen auf Implementierungsebene mit festen Prozessen prüfen.

Definition und Anwendung von Modellierungsrichtlinien

Die modellbasierte Entwicklungsumgebung Simulink/TargetLink eignet sich für eine strukturkonforme Model-

Das Power Split Device verteilt die Drehmomente von Verbrennungsmotor und Lastmaschine an die Räder sowie den Generator.



lierung. Angepasste Modellierungsrichtlinien können in den Richtlinienprüfer MES Model Examiner® integriert und so einzelne Schritte automatisiert werden. Das entlastet die Entwickler bei ihrer Arbeit und sorgt für eine konsistente Modellierung sowie effizienten SerieneCode, der zusätzlich eine hohe Konformität zu MISRA C erreicht.

Die Implementierung der Werkzeuge und neuen Workflows unterstützte dSPACE zusammen mit BTC Embedded Systems durch Beratung in Form von umfassenden, praxisnahen Workshops und Engineering-Dienstleistungen. Zusätzlich orientiert sich die Entwicklung an den ISO-26262-Referenzworkflows für TargetLink, BTC EmbeddedValidator und BTC EmbeddedTester.

Erfahrungen mit der neuen Werkzeugkette

Bei der Evaluierung von TargetLink im Zusammenspiel mit den Testwerkzeugen von BTC ergab sich eine signifikante Reduzierung der Personenstunden im Entwicklungsprozess einschließlich herkömmlicher Prüfprozesse. Dadurch ließ sich das Ziel, neue Funktionen schnell und präzise zu entwickeln, umsetzen. Bei der täglichen Arbeit schätzten die Entwickler vor allem die intuitiv automatisierbaren Konfigurationsmöglichkeiten von TargetLink. Mit dieser Umgebung lässt sich nicht nur leicht implementierbarer Code erzeugen, sondern sie stellt auch angepasste Mechanismen bereit, die beispielsweise dafür sorgen, dass sich die Konfigurationseinstellungen mit einem Klick auf alle Modellblöcke anwenden lassen. Darüber hinaus konnte auch die Zusammenarbeit mit den Zulieferern effizienter gestaltet werden, indem eine vorher auf beiden Seiten nach eigenen Prozessen vorgenommene Software-Implementierung, durch die automatische SerieneCode-Generierung mit TargetLink abgelöst wurde.



Der Verbrennungsmotor des Toyota Prius. Er ist direkt mit den elektrischen Maschinen und dem Power Split Device verbunden.



Die Power Control Unit führt die Regelung aller Hybridfahrfunktionen aus.

Vollständige Absicherung

Während sich mit den klassischen Testmethoden bei Toyota durchaus ein gewisses Vertrauen in die Code-Qualität erreichen lässt, erfordern sie dennoch eine hohe Anzahl an Arbeitsstunden. Die formale Verifikation, die der BTC EmbeddedValidator bie-

tet, sichert die Konsistenz zwischen Spezifikation und Modell automatisch und vollständig ab. Das folgende Beispiel zeigt, wie mit einem vollständigen mathematischen Beweis eine Verletzung von Anforderungen ausgeschlossen werden kann: Überprüfe, ob für jede Kombination

>>



Aufbau des elektrifizierten Antriebsstrangs des Toyota Prius 4.

„Wir haben eine Basis für die Verbesserung der Effizienz des gesamten Entwicklungsprozesses einschließlich der Inspektion geschaffen. Dazu setzen wir auf TargetLink, BTC EmbeddedValidator und BTC EmbeddedTester in Verbindung mit Automatisierungsmechanismen.“

Naoki Ishikawa, Toyota Motor Corporation

von Eingangssignalen ausnahmslos Folgendes erreicht werden kann:

- Falls eine Situation eintritt, in der die Batterie nicht verwendet werden kann,
- schaltet das Fahrzeug in den Fahrmodus, der die Batterie nicht benutzt.

Der BTC EmbeddedValidator erzeugt für diese Anforderung alle möglichen Wertekombinationen und überprüft, ob ein Gegenbeispiel vorliegt. Darüber hinaus bietet der BTC EmbeddedTester einen vollautomatischen Back-to-Back-Test zwischen Simulink/TargetLink-Modellen und dem Serien-

code sowie eine automatische Generierung struktureller Testfälle für eine vollständige Code-Abdeckung (MC/DC). Zusätzlich deckt er Probleme im Code auf, zum Beispiel Wertebereichsverletzungen oder Divisionen durch Null. Die Ergebnisse gelten für alle erzeugten Vektoren und werden mit einem automatisch erstellten Bericht bestätigt.

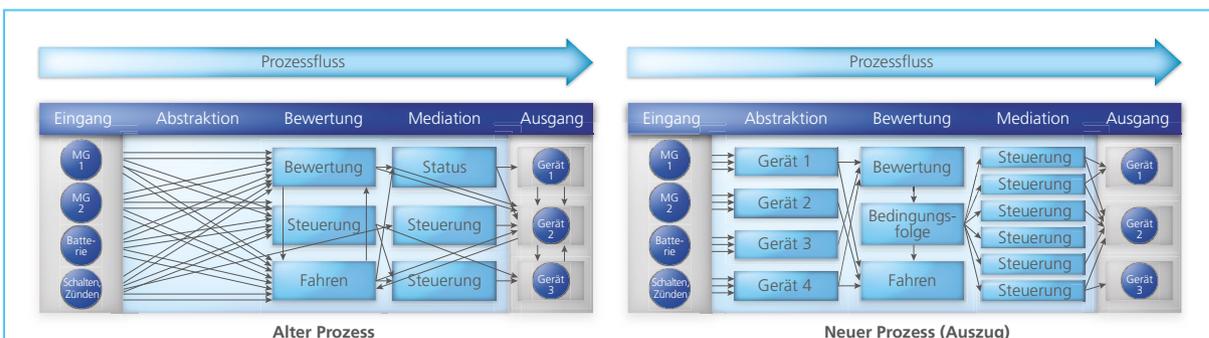
Bei der finalen Absicherung werden bei den Back-to-Back-Tests auch der Ziel-Mikroprozessor (Hardware) und der Cross Compiler (Objektcode) integriert. Damit werden TargetLink und BTC EmbeddedTester kombiniert, um

die Processor-in-the-Loop (PIL)-Simulation mit dem tatsächlichen Ziel-Mikroprozessor auszuführen. Dieser Testschritt führt zu mehr Effizienz bei der ISO-26262-konformen Absicherung.

Herausforderungen und Ausblick

Toyota implementierte parallel zur Fahrzeugentwicklung eine Vielzahl an Werkzeugen und Umgebungen, darunter einen All-at-Once-Entwicklungsprozess, neue Prozesse und automatisierte Mechanismen. Weil aber die Zahl der Arbeitsstunden zunächst stärker wuchs als erwartet, musste ein geeignetes Prozessmanagement

Die Struktur der Steuerung vor und nach der Optimierung.





Nutzen und Vorteile der Prozesse und Werkzeuge im Entwicklungsprozess bei modellbasierter Implementierung.

„Durch den Einsatz der Werkzeuge konnten wir den Weg für eine effizientere Entwicklung von Hybridfahrzeugen ebnen.“

Shinichi Abe, Toyota Motor Corporation

etabliert werden, um den Prozess durchgängig beobachten und optimieren zu können. Weitere Verbesserungen der Effizienz des Entwicklungsprozesses, der Werkzeugkette und auch der Entwicklungsumgebung sind bereits geplant, so dass deren Vorteile für die Entwickler noch deutlicher werden. Beispielsweise untersucht Toyota derzeit den verstärkten Einsatz von Reglermodellen in frühen Phasen der Entwicklung

(virtuelle Simulationen mit dSPACE VEOS®). Zudem soll die Entwicklungsumgebung kontinuierlich verbessert werden, zum Beispiel sollen sich Komponenten einschließlich Testmustern, Parametern und Modellen (xIL-Regelstrecken) mit dSPACE SYNECT® wiederverwenden lassen. Zudem soll die Umgebung noch benutzerfreundlicher werden. ■

Shinichi Abe, Naoki Ishikawa
Toyota Motor Corporation

Mr. Shinichi Abe

Shinichi Abe ist General Manager der Hybrid Vehicle Management System Development Division bei der Toyota Powertrain Company, TOYOTA MOTOR CORPORATION in Aichi, Japan.



Mr. Naoki Ishikawa

Naoki Ishikawa war Assistant Manager bei der Hybrid Vehicle Management System Development Division und arbeitet nun in gleicher Funktion im Process Improvement MBD Control 2 Group, Process Innovation Department, Unit Development Digital Innovation Division bei der Toyota Powertrain Company, TOYOTA MOTOR CORPORATION in Aichi, Japan.



Der optimierte Entwicklungsprozess beschränkt sich auf die absolut notwendigen Entwicklungsschritte und sorgt so für mehr Effizienz.

