

Rapid Prototyping im BMW Wasserstoff-Rekordfahrzeug

Von Roger Perthen, BMW Group, Jürgen Fischer und Markus Kasper, ETAS

Zielsystemidentisches Entwicklungssystem von ETAS im Praxiseinsatz

Mit insgesamt neun Geschwindigkeitsrekorden beweist BMW konsequent, dass alternative Energieträger wie Wasserstoff nicht nur umweltfreundlich, sondern auch extrem leistungsstark sein können. Auf dem Hochgeschwindigkeitskurs im französischen Miramas erreichte das BMW-Rekordfahrzeug die Spitzengeschwindigkeit von 302,4 km/h.

Unter seiner Kohlefaserhülle birgt der „H₂R“ einen 6,0 Liter Zwölfzylinder-Verbrennungsmotor, der 210 KW/285 PS leistet (Bild 2). Dieser beschleunigt den Prototypen in rund sechs Sekunden aus dem Stand auf Tempo 100 km/h und weiter bis zu der Spitzengeschwindigkeit von 302,4 km/h.

Unter Aufsicht der FIA stellt der „H₂R“ folgende Weltrekorde auf:

- 1 Kilometer mit fliegendem Start: 11,993 Sek. 300,190 km/h
- 1 Meile mit fliegendem Start: 19,912 Sek. 290,962 km/h
- 1/8 Meile mit stehendem Start: 9,921 Sek. 72,997 km/h
- 1/4 Meile mit stehendem Start: 14,933 Sek. 96,994 km/h
- 1/2 Kilometer mit stehendem Start: 17,269 Sek. 104,233 km/h
- 1 Meile mit stehendem Start: 36,725 Sek. 157,757 km/h
- 10 Meilen mit stehendem Start: 221,052 Sek. 262,094 km/h
- 1 Kilometer mit stehendem Start: 26,557 Sek. 135,557 km/h
- 10 Kilometer mit stehendem Start: 146,406 Sek. 245,892 km/h

Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor basiert auf dem Benzin-Triebwerk des BMW 760i und verfügt damit über modernste Technologien, wie z. B. die vollvariable Ventilsteuerung VALVE-TRONIC. Die Modifikationen betreffen vor allem die Brennstoffbereitstellung und -einspritzung, die BMW den spe-

ziellen Eigenschaften von Wasserstoff angepasst hat. Grundsätzlich hat Wasserstoff deutlich andere Verbrennungseigenschaften als Benzin oder Dieselmotoren. Er verbrennt bei normalem Luftdruck zwar schneller, aber mit etwas niedrigerer Temperatur als Benzin. Im Motor sorgt die hohe Brenngeschwindigkeit des Wasserstoff-Luft-Gemischs dafür, dass eine höhere Temperatur als in einem benzinbetriebenen Motor entsteht. Dementsprechend wurde die Motorsteuerung des BMW-Rekordfahrzeugs „H₂R“ so angepasst, dass das Gemisch erst im oberen Totpunkt des Kolbens gezündet wird, um die maximale Leistung zu erreichen. Benzin-Luft-Gemische verbrennen vergleichsweise langsam. Deswegen müssen sie mit steigender Drehzahl zunehmend früher gezündet werden, sodass mit Beginn der Abwärtsbewegung des Kolbens der maximale Druck anliegt. Der höhere Verbrennungsdruck des Wasserstoff-Gemischs hat dabei deutliche Vorteile: Mehr Kraft aus gleichem Energieeinsatz ergibt einen besseren Wirkungsgrad. Die vollvariable Ventilsteuerung ermöglicht es, den Gaswechsel des Zwölfzylinder-Motors optimal auf Wasserstoff-Betrieb abzustimmen. Die möglichst späte Einblasung des Wasserstoffs in das Saugrohr stellt gleichzeitig hohe Anforderungen an die Einblasventile. Da gasförmiger Wasserstoff mehr Volumen pro Energieeinheit als flüssiges

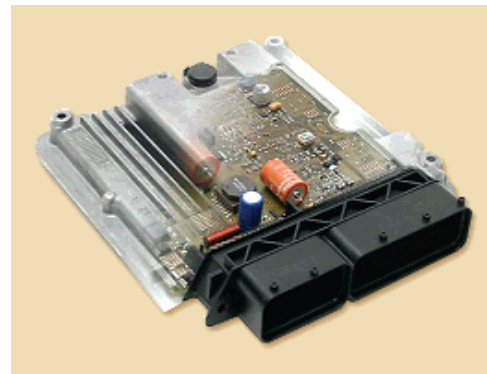


Bild 1: Entwicklungssteuergerät M9U.

Benzin aufweist, sind die Einblasventile größer als konventionelle Einspritzventile. Hinzu kommt, dass sie eine deutlich größere Spreizung abdecken: Sie müssen mit unterschiedlichen Systemdrücken und gleichzeitig sowohl mit sehr kurzen als auch mit längeren Einspritzzeiten arbeiten können.

Ein weiterer sehr wichtiger Bereich ist die bedarfsgerechte und sichere Brennstoffbereitstellung, die sich gegenüber der von Otto- und Dieselmotoren wesentlich unterscheidet. Wichtige Komponenten sind dabei der Edelstahl-High-Tech-Tank sowie eine zuverlässige Mess- und Regeleinheit. Der Tank kann mit bis zu elf Kilogramm flüssigem, minus 253 Grad kaltem Wasserstoff befüllt werden, was der Energie von 35 Liter Benzin entspricht (Bild 5).

Konstruiert und entwickelt wurde das BMW-Rekordfahrzeug „H₂R“ von der BMW Forschung und Technik GmbH, einer Tochtergesellschaft der BMW AG. In nur zehn Monaten wurde der Rekordwagen auf die Räder gestellt. Möglich wurde das durch die konse-

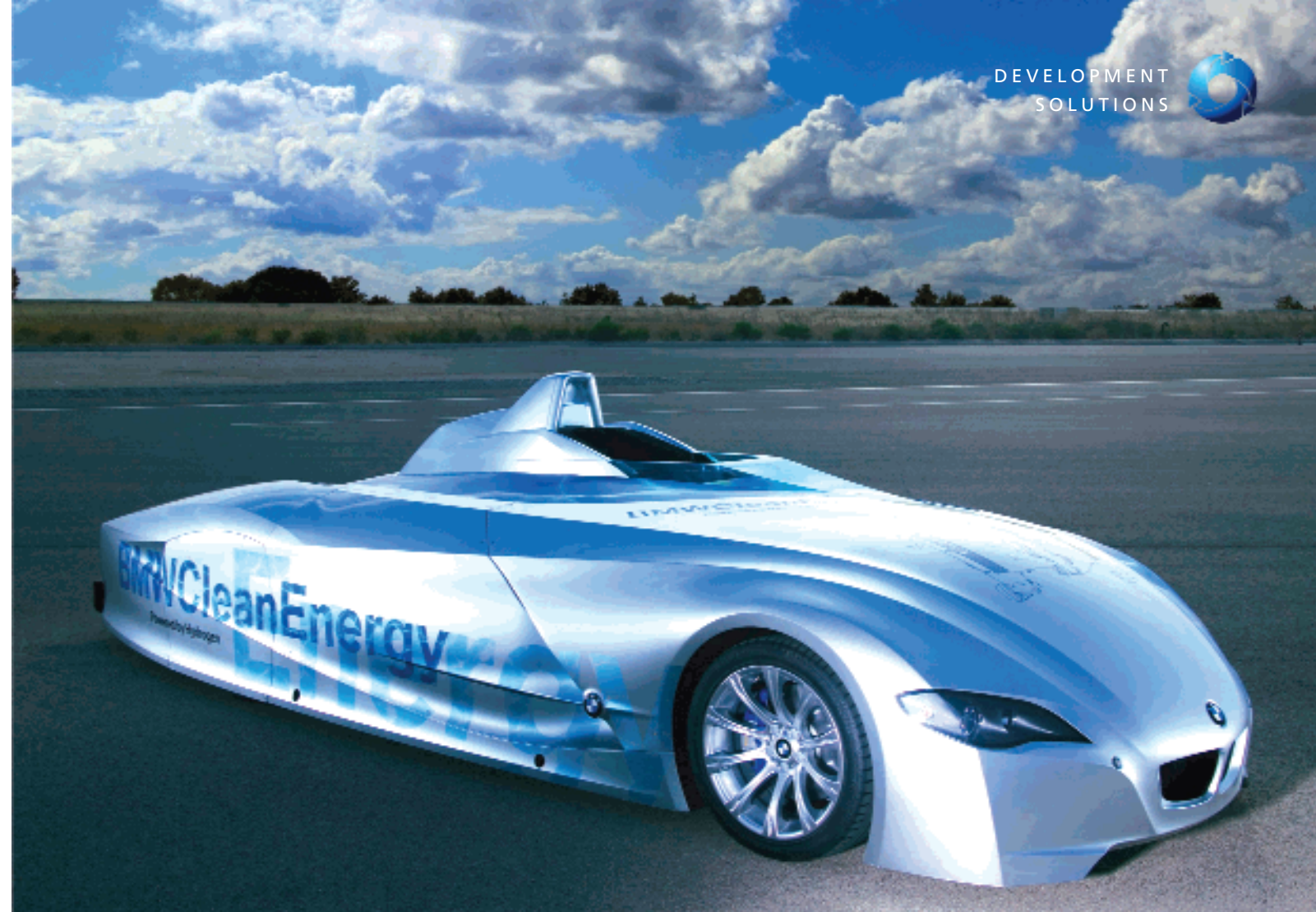


Bild 2: Wasserstoff-Rekordfahrzeug „H₂R“ von BMW.

quente Verwendung von Erfahrungen, Komponenten sowie Werkzeugen aus der Serienentwicklung.

Ein Beispiel für diese konsequente Verwendung von Serienkomponenten ist das leistungsfähige und robuste Entwicklungssteuergerät M9U (Bild 1) der Robert Bosch GmbH sowie die ASCET-Entwicklungsumgebung der ETAS GmbH. Die M9U und ASCET bieten unter Berücksichtigung eingeführter Standards eine sehr große Flexibilität und ermöglichen BMW Zugang zu den normalerweise dem Systemlieferanten vorbehaltenen „inneren“ Eigenschaften des elektronischen Steuergeräts. Daraus ergeben sich vielfältige neue Möglichkeiten. Das wird realisiert, ohne dass der Systemlieferant oder Fahrzeughersteller sein Know-how offen legen muss. Der Fahrzeughersteller ist somit in der Lage, Modifikationen sehr schnell und ohne die Unterstützung des Systemlieferanten vorzunehmen. Diese Unabhängigkeit vom Systemlieferanten ist wichtig, da dieser die Kapazitäten für eine intensive Unterstützung nur mit einer gewissen Verzögerung bereitstellen kann.

Der Vorteil eines solchen Vorgehens für den Fahrzeughersteller besteht darin, dass er relativ schnell in der Lage ist, einen Prototypen für elektronische Steuerungen und Regelungen aufzubauen und dort konkret an seiner eigentlichen Aufgabe arbeiten kann. Bei den Teilen, an denen nichts geändert werden soll oder muss, werden die vom Systemhersteller zur Verfügung gestellten Komponenten verwendet.

Um im Bereich der Signalerfassung und -generierung die Identität mit dem angestrebten Zielsystem zu gewährleisten, werden, soweit möglich, Bauelemente (z. B. ASICs) aus dem Zielsystem verwendet. Die Rechenleistung des Mikrocontrollers kann durch Integration eines Simulationsprozessors wesentlich gesteigert werden. Bild 3 zeigt das Systemblockdiagramm des Entwicklungssystems.

Damit das Entwicklungssystem auch bezüglich der Software ein möglichst mit dem Zielsystem vergleichbares Verhalten aufweist und somit die Ergebnisse einfach auf das Zielsystem über-

tragen werden können, werden möglichst viele Softwarekomponenten aus der Serienentwicklung verwendet. Wesentliche Bestandteile neben der Anwendungssoftware sind die aus der Serie übernommenen Services, Hardwaretreiber sowie das Echtzeit-Betriebssystem. Die Services sind unterstützende und optimierte Routinen für arithmetische Berechnungen, zum Filtern von Signalen sowie zur Integration und Interpolation. Die Hardwaretreiber kapseln die Zugriffe der Anwendungssoftware auf die Hardware und stellen Schnittstellen z. B. für das Auslesen von A/D-Wandlern, das Lesen und Schreiben digitaler und pulsweitenmodulierter Ein-/Ausgänge und die Kommunikation z. B. über den CAN-Bus zur Verfügung. Die Leistungsfähigkeit des Entwicklungssystems kann durch die Einbindung eines Simulationsprozessors deutlich gesteigert werden. Dazu wird die für den Einsatz in einem Ein-Prozessor-System entworfene Softwarestruktur so erweitert, dass neben dem Mikrocontroller auch der Simulationsprozessor einfach eingebunden werden kann.

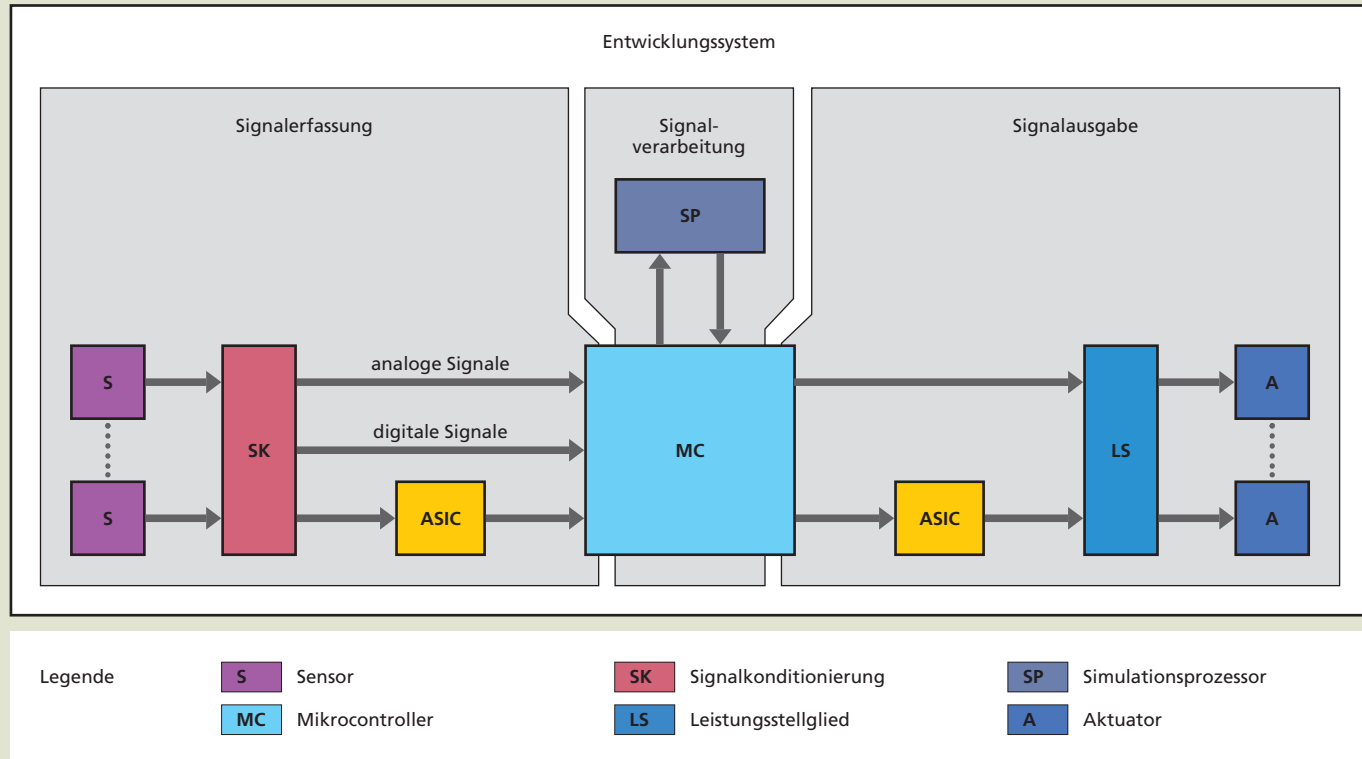


Bild 3: Systemblockdiagramm.

Die Software-Architektur des Zwei-Prozessor-Systems ist in Bild 4 dargestellt. Die Anwendungssoftware ist in diesem Fall komplett auf den Simulationsprozessor ausgelagert.

Die Auslagerung der Anwendungssoftware auf den Simulationsprozessor wird durch die Einführung einer Kommunikationsschnittstelle ermöglicht. Über diese Kommunikationsschnittstelle stellt der Mikrocontroller dem Simulationsprozessor die benötigten Eingangsgrößen zur Verfügung bzw. holt die Ausgangsgrößen von diesem ab. Da die Anwendungssoftware lediglich auf das Betriebssystem, die Services sowie die Hardwareabstraktion zugreift und das Betriebs-

system und die Services von Simulationsprozessor und Mikrocontroller weitestgehend identisch sind, muss nur noch von der Hardwareabstraktion sichergestellt werden, dass sich die Schnittstelle zur Anwendungssoftware identisch zu der Schnittstelle der hardwarenahen Software verhält. Auf diese Weise ist es sehr einfach möglich, die Anwendungssoftware auf dem Simulationsrechner zu entwickeln und anschließend auf den Mikrocontroller zu verschieben. Wenn die komplette Anwendungssoftware auf den Mikrocontroller verschoben wurde, kann das System ohne Simulationsprozessor betrieben werden. Dadurch ist es möglich, Bauraum, Leistungsaufnahme und Kosten einzusparen.

Sowohl die Anwendungssoftware für den Mikrocontroller als auch die Anwendungssoftware für den Simulationsprozessor wird mit dem grafischen Entwicklungswerkzeug ASCET erstellt. Durch die Verwendung einer einheitlichen Entwicklungsumgebung wird das Verschieben einzelner Funktionen zwischen Mikrocontroller und Simulationsprozessor erheblich erleichtert. Die Verwendung einer grafischen Entwicklungsumgebung ermöglicht es, für jede Aufgabe die am Besten passende Beschreibungsform (wie Blockdiagramm, Zustandsautomat oder textuelle Programmiersprache) zu verwenden. Aus allen Einzelbestandteilen wird mittels automatischer Codegenerierung und anschließendem Kompilieren- und Linkvorgang ein ausführbares Programmfile (*.s19) und eine Beschreibungsdatei nach dem ASAM MCD 2-Standard (*.a2l) generiert (Bild 6).

Bei der Software-Entwicklung für den Simulationsprozessor wird die Anwendungssoftware in den von der ASCET-Entwicklungsumgebung bereitgestellten Beschreibungsformen spezifiziert. Mit Hilfe der ASAM MCD 2-Datei des Mikrocontrollers kann eine Kommunikationsverbindung zwischen Größen des Mikrocontrollers und denen des Simulationsprozessors hergestellt werden. Auch hier wird aus den Einzelbestandteilen mittels automatischer Codegenerierung und anschließendem Kompilieren- und Linkvorgang ein

Bild 4: Softwarestruktur des Entwicklungssystems.

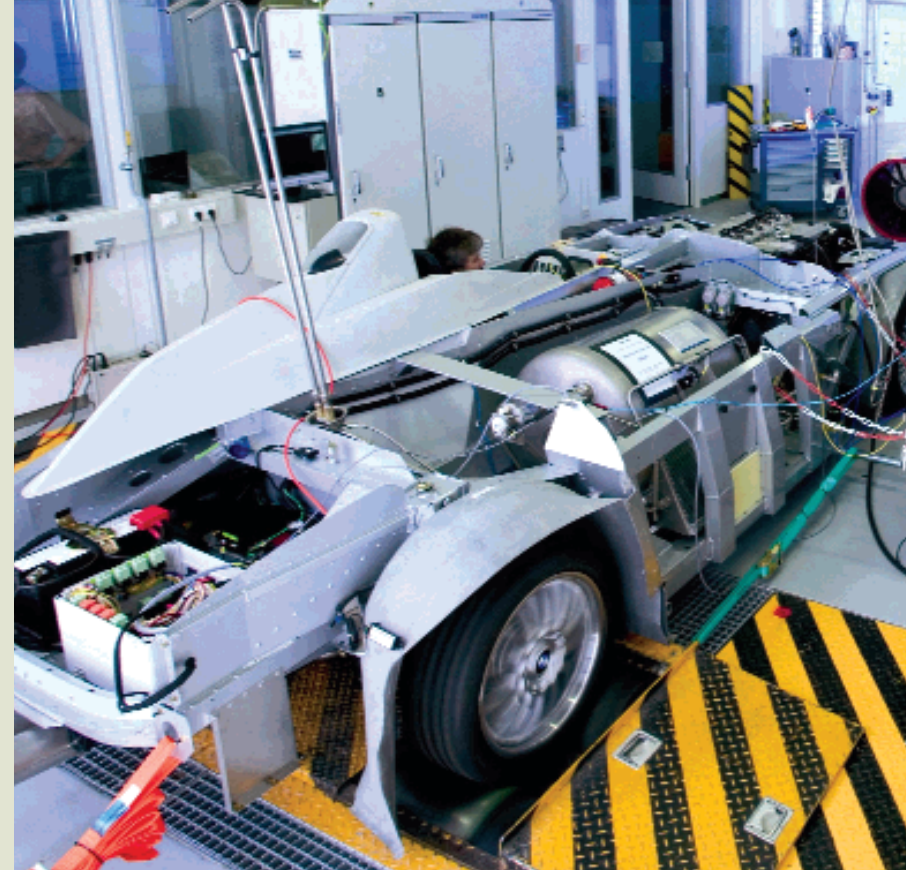
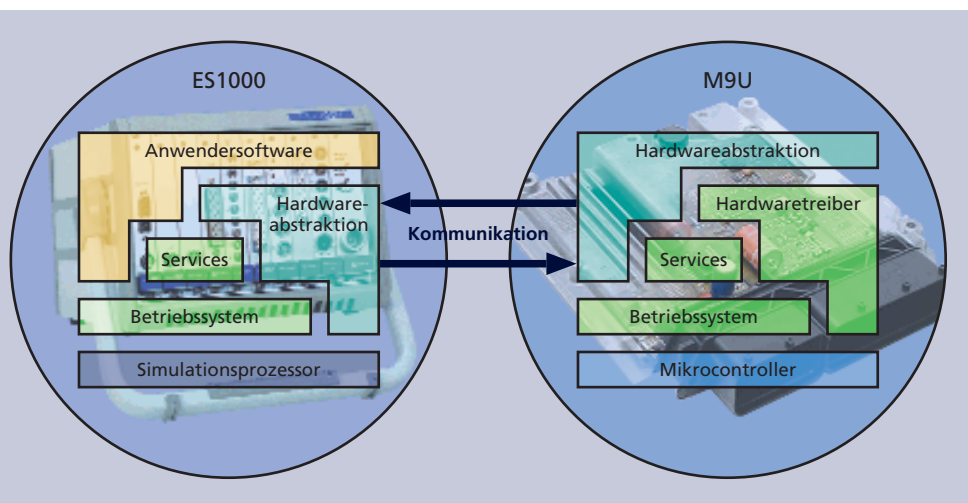


Bild 5: Innenleben des „H₂R“.

schnell neue Konzepte und Anforderungen umzusetzen und in der realen Umgebung auf Funktion und Akzeptanz zu testen. Dies wird erreicht, indem die bislang den Systemlieferanten vorbehaltenen Wiederverwendung von Erfahrungen und Ergebnissen aus Serienentwicklungen systematisch und gut handhabbar für Forschungs- und Entwicklungsaufgaben zur Verfügung gestellt wird. Mit diesem Ansatz werden diese Erfahrungen und Ergebnisse BMW als Fahrzeughersteller zugänglich, ohne dass die Systemlieferanten ihr komplettes Know-how offen legen müssen. Damit werden auch sehr effiziente Möglichkeiten für das Simultaneous Engineering zwischen Fahrzeughersteller und Systemlieferant eröffnet.

Bild 6: Einsatz der ASCET-Entwicklungsumgebung im Projekt „H₂R“.

ausführbares Programm erstellt. Dieses Programm kann direkt mit Hilfe der Entwicklungsumgebung auf dem Simulationsprozessor ausgeführt werden. In Bild 6 ist die ASCET-Entwicklungsumgebung mit den entsprechenden Ein- und Ausgabedateien zu sehen.

Zusammenfassung
 Das hier vorgestellte Rapid Prototyping-System hat dazu beigetragen, das Rekordfahrzeug „H₂R“ in einer ebenfalls rekordverdächtigen Zeit von weniger als zehn Monaten zu realisieren. Durch die beschriebene Vorgehensweise war es möglich, sehr

