



# Sensorcluster-Simulation für Sensorfusionstests in Echtzeit

Der Trend zum automatisierten Fahren führt zu immer umfangreicherem und komplexeren Sensoranordnungen im Fahrzeug. Fahrfunktionen ausschließlich im realen Straßenverkehr zu testen, ist nicht mehr praktikabel. Ursächlich dafür ist der steigende Aufwand für die Datenerfassung in der realen Welt sowie die Einführung der Funktionen in mehreren Märkten mit unterschiedlichen Anforderungen. IPG Automotive beschreibt effiziente Lösungen für die Entwicklung von Perzeptionsmodulen und den Test von Fahrerassistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen.



© IPG Automotive

## VERFASSERT VON



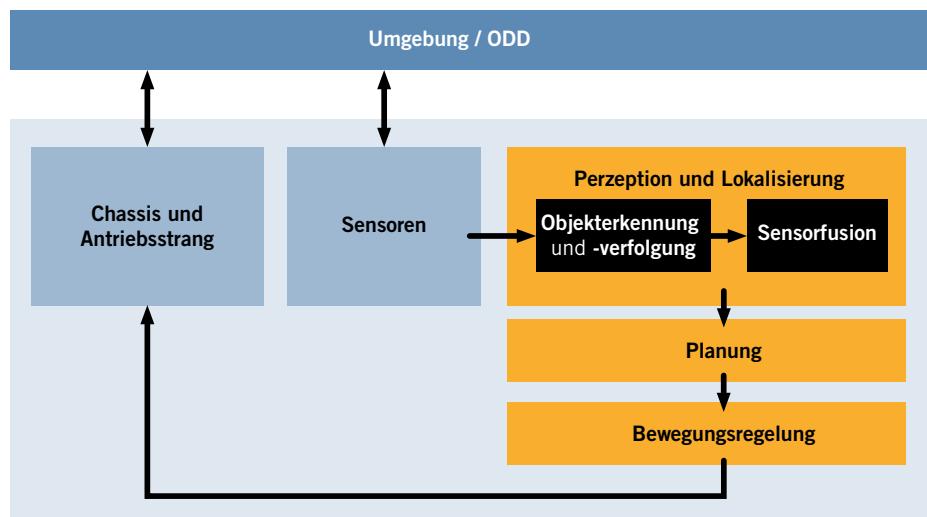
**Martin Herrmann**  
ist Business Development Manager  
ADAS and Automated Driving bei  
IPG Automotive in Karlsruhe.



**Henning Kemper**  
ist Specialist Editor bei IPG  
Automotive in Karlsruhe.

Um zu gewährleisten, dass eine automatisierte Fahrfunktion wie gewünscht arbeitet, werden verschiedene Softwaremodule entwickelt und getestet, **BILD 1**. Das erste Modul umfasst die Perzeption und Lokalisierung. Hierbei kommen verschiedene Sensortechnologien wie Kamera, Radar, Lidar, Ultraschall, GNSS oder HD-Karten zum Einsatz. Diese erfassen die Umgebung und ermöglichen eine hochgenaue Eigenlokalisierung. Im Planungsmodul werden auf Basis der Navigationsaufgabe und weiterer Parameter Entscheidungen für Fahrmanöver getroffen und eine Zieltrajektorie berechnet. Diese Parameter umfassen die aktuelle, von der Perzeption erkannte Umgebung sowie Witterungsbedingungen, fahrdynamische Randbedingungen und Fahrkomfort. Das dritte Modul beinhaltet die Bewegungsregelung des Fahrzeugs. Dort wird die Zieltrajektorie mithilfe der verfügbaren Aktuatoren in Form von Lenkung, Antrieb und Bremse möglichst präzise, komfortabel und sicher umgesetzt.

Auf dem Prüfgelände und im Feldversuch wird stets das Komplettsystem der automatisierten Fahrfunktion getestet – von der Erfassung der Sensordaten bis hin zur Bewegungsregelung. Im simulationsgestützten Versuch ergeben sich hingegen, neben dem Gesamtsystemtest, auch Möglichkeiten für den isolierten Test einzelner Module, da ein Simulationsprogramm jederzeit passende Informationen für die einzelnen Schnittstellen der jeweiligen Module bereitstellen kann.



**BILD 1** Schematischer Aufbau eines automatisierten Fahrzeugs (© IPG Automotive)

## SIMULATION VON SENSORCLUSTERN

Sensorrohdaten bilden die Grundlage für die Tests der einzelnen Perzeptionsanwendungen sowie des Gesamtsystems. Dabei werden hohe Anforderungen an den Realismus- und Detailgrad der synthetischen Sensordaten gestellt. Die detaillierten Physical Sensor Models in der Simulationsumgebung CarMaker stehen für alle gängigen Technologien zur Umfelderfassung im Fahrzeug zur Verfügung: Kamera, Radar, Lidar und Ultraschall. Durch die Simulation der Sensorrohdaten lassen sich Perzeptionsalgorithmen sowie die gesamte Signalkette bis hin zu Sensorfusion, Objekt-Tracking und Erzeugung des Umfeldmodells testen. Die Modelle stellen Eingangsdaten für Perzeptionsalgorithmen des Sensors bereit, beispielsweise Bilddaten für die Kamerasimulation oder eine Punktwolke für die Lidarsimulation. Bei der Generierung der Rohsignale werden die Materialeigenschaften der Objekte sowie detaillierte physikalische Effekte bei der Signalausbreitung berücksichtigt.

Die parallele Simulation mehrerer Sensoren, die für die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen erforderlich ist, wird als Sensorcluster-Simulation bezeichnet. Um diese zu ermöglichen, kommen performante Rechner mit leistungsstarken GPUs zur Datengenerierung zum Einsatz. Im Regelfall sind mehrere GPUs erforderlich, um die Anforderungen an den Speicherbedarf

und die Simulationsgeschwindigkeit beispielsweise für die Echtzeitsimulation an Hardware-in-the-Loop(Hil)-Prüfständen zu erfüllen. Die benötigte Anzahl ist abhängig von der Größe des Sensorclusters sowie der Auflösung der einzelnen Sensoren – also etwa der Anzahl der Kamerapixel, der Lidarpunkte, oder der Weite und Breite des Radar-Sichtfelds. Auch bei der Durchführung von Fahrszenarien in komplexen 3-D-Umgebungen wird auf diese Weise eine leistungsstarke Sensorsimulation sichergestellt.

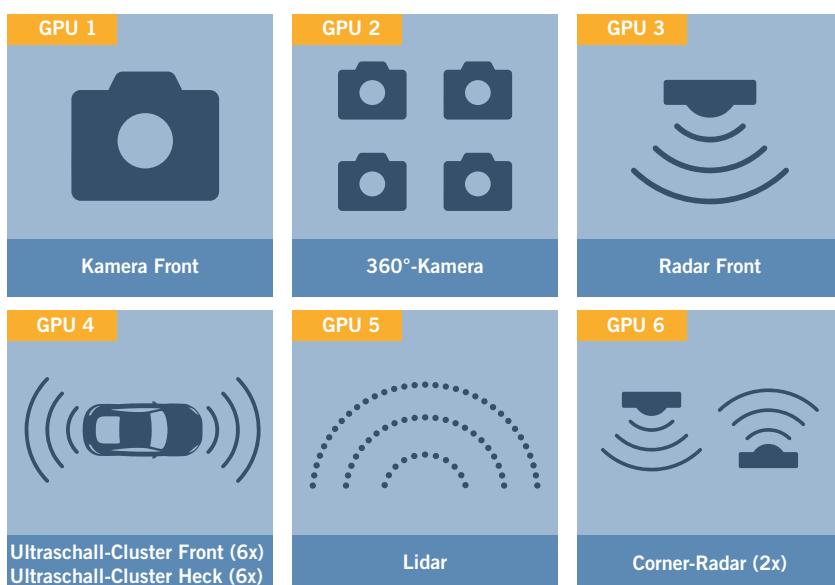
Die Hardwarelösung SensCompute stellt die benötigte GPU-Rechenleistung für die Sensorcluster bereit. Durch die Skalierbarkeit der GPU-Ausstattung und die intuitiv umsetzbare Verteilung der Sensormodelle auf die verschiedenen GPUs können beliebige Sensorcluster in Echtzeit und in vielen Fällen sogar mit mehrfacher Echtzeitgeschwindigkeit simuliert werden, **BILD 2**. Dies verkürzt Testprozesse um ein Vielfaches.

## ERZEUGUNG SYNTHETISCHER DATENSÄTZE

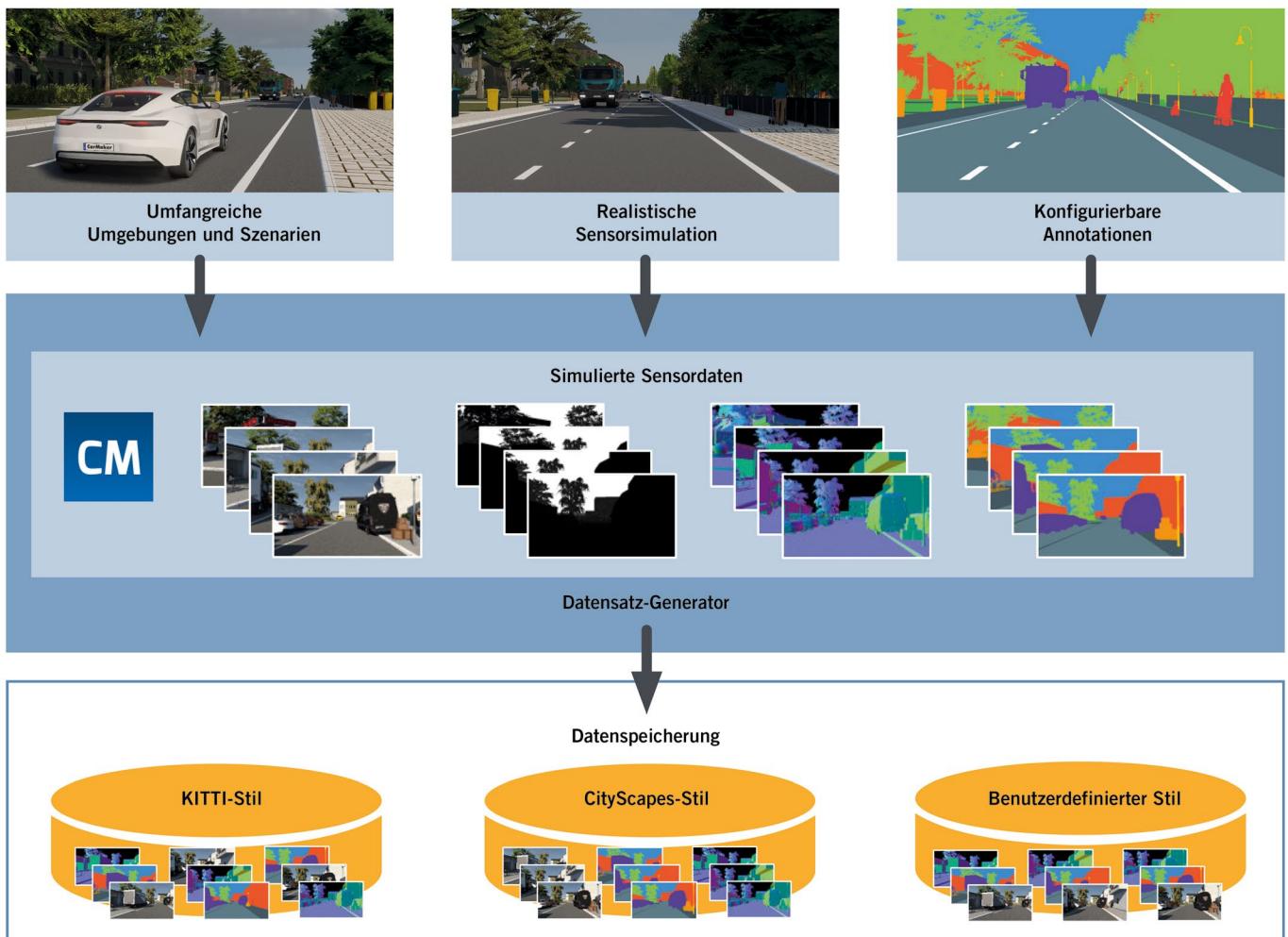
Für reine Perzeptionstests wird häufig ein Open-Loop-Ansatz verwendet, bei dem Sensordatenaufzeichnungen aus der realen Welt erneut abgespielt werden. Dabei erfolgt ein Abgleich der tatsächlich vom Perzeptionsmodul erkannten Objekte mit den Objekten, die das Perzeptionsmodul erkennen sollte, der sogenannten Ground Truth. Diese Ground Truth sowie die Sensordaten

bilden darüber hinaus auch die Grundlage für den Trainingsprozess der neuronalen Netze. Sie wird vorab manuell und teilweise mit der Unterstützung von künstlicher Intelligenz (KI) generiert. Dieser Prozess ist allerdings fehleranfällig und zeitaufwendig. Hinzu kommt, dass Sensordaten in der realen Welt nicht beliebig aufgezeichnet werden können, da Verkehrssituationen und Umweltbedingungen nicht exakt kontrollierbar sind und der dahinterstehende Prozess kostspielig und langwierig ist.

An dieser Stelle kann die Simulation durch die Generierung synthetischer Sensordatensätze unterstützen. Diese ermöglichen es, reale Datensätze mit synthetischen Anteilen zu ergänzen – beispielsweise dann, wenn bestimmte Daten unterrepräsentiert sind und in der realen Welt nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand erhoben werden können. Auch wenn noch keinerlei aufgezeichnete Daten vorliegen, kann die Simulation einen hilfreichen Beitrag leisten: Da in frühen Entwicklungsphasen noch keine geeigneten physische Versuchsträger existieren, ist es mit ihrer Hilfe möglich, einen Basisdatensatz für Training und Test zu erstellen. Einen weiteren entscheidenden Vorteil stellt die schnelle Anpassungsfähigkeit an neue Situationen dar. Wenn sich beispielsweise eine neue Kategorie von Verkehrsteilnehmern etabliert, wie vor einigen Jahren E-Scooter, können diese mithilfe der Simulation schnell und unkompliziert in den Trainingsdatensatz aufgenommen werden.



**BILD 2** Verteilung der Sensormodelle auf verschiedene GPUs (© IPG Automotive)



**BILD 3** Bestandteile eines Generators für synthetische Sensordatensätze (© IPG Automotive)

Nicht zuletzt bieten synthetische Sensordaten den Vorteil, dass die Ground Truth direkt in der Simulation verfügbar ist, da der Zustand der simulierten Umgebung zu jedem Zeitpunkt in idealer und fehlerfreier Form bekannt ist. Die daraus resultierende fehlerfreie Annotation kann je nach Anforderung als 2-D- oder 3-D-Bounding-Box sowie als pixelgenaue semantische Segmentierung automatisiert abgelegt werden. Die annotierten Objektklassen sind dabei frei konfigurierbar und somit an die spezifischen Projektanforderungen anpassbar.

Bei der Ausführung der Simulation werden die Sensordaten des gesamten Clusters einschließlich der dazugehörigen Annotationen für die einzelnen Sensoren in einem konsistenten Datensatz abgespeichert, **BILD 3**. Bei Anwendungen, in denen eine direkte Fusion der Rohdaten mehrerer Sensoren miteinander erfolgt, gilt dies ebenfalls für das vollständige

Umfeldmodell. Da kein Industriestandard für die zu verwendenden Objektklassen existiert, ist es möglich, diese anforderungsabhängig festzulegen. So werden nur die tatsächlich benötigten Annotationen erzeugt und darüber hinaus bekannte Klassifizierungen, beispielsweise im KITTI-, CityScapes-, oder benutzerdefinierten Stil festgelegt. Auch die Speicherrate der Sensordaten und der dazugehörigen Annotationen ist frei konfigurierbar. Dieser Generator für synthetische Datensätze kann durch die Nutzung von Docker-Containern parallelisiert in der Cloud ausgeführt werden, um in kürzester Zeit große Datenmengen zu generieren.

#### SENSORCLUSTER-SIMULATION IM GESAMTSYSTEMTEST

Um sicherzustellen, dass der virtuelle Prototyp tatsächlich der von der auto-

nomen Fahrfunktion geplanten Trajektorie folgt, ist für den Gesamtsystemtest hingegen ein Closed-Loop-Ansatz erforderlich. Die erzeugten Signale zur Fahrzeugsteuerung werden von einem Fahrdynamikmodell umgesetzt und die Fahrzeuggbewegung physikalisch korrekt simuliert. Für die Fahrzeugposition können dann fortlaufend in regelmäßigen Zeitabständen die entsprechenden neuen Sensordaten berechnet werden. Analog zum realen Straßenverkehr können in der Simulation virtuelle Verkehrsteilnehmer auf das getestete Fahrzeug reagieren, sodass ein realistisches Abbild eines Fahrversuchs entsteht.

Die Closed-Loop-Simulation ist wahlweise als SiL- oder als HiL-Simulation durchführbar. Da zur Verarbeitung eines umfangreichen Sensoraufbaus – wie er für ein autonomes Fahrzeug erforderlich ist – leistungsfähige Hardware benötigt wird, kommt für den End-to-End-Test

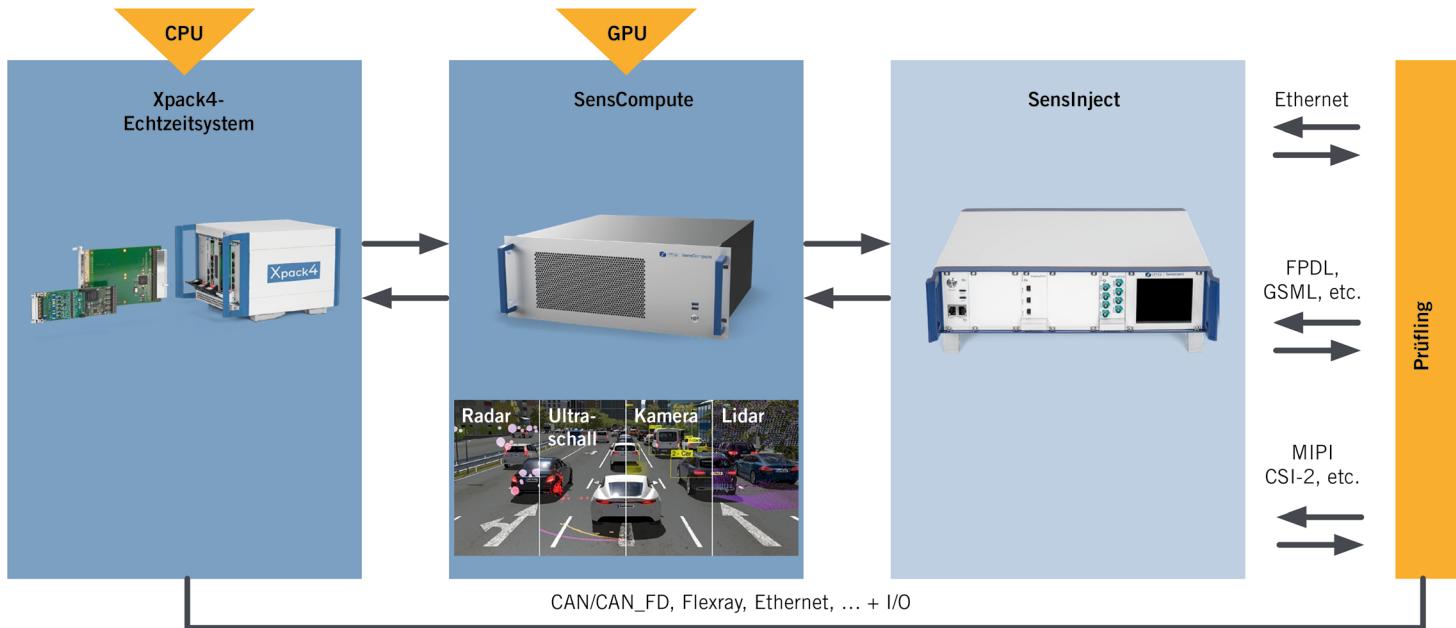


BILD 4 Echtzeitsimulationsumgebung für automatisierte Fahrfunktionen inklusive Perceptionsmodul  
(© IPG Automotive)

häufig ein HiL-Aufbau zum Einsatz. Die Hauptanforderung bei der HiL-Simulation ist dabei die Berechnung aller Bestandteile der Simulationskette in harter Echtzeit, um eine präzise Reaktion des Systems gewährleisten zu können. Die CPU-basierten Anteile der Simulation – also die Gesamtfahrzeugsimulation CarMaker, die Restbussimulation und die I/O für das Steuergerät (Electronic Control Unit, ECU) der autonomen Fahrfunktion – werden entsprechend auf einem Xpack4-Echtzeitsystem ausgeführt, **BILD 4**. Hier erfolgt beispielsweise die Fahrdynamiksimulation mit einer Zykluszeit von 1 ms.

Die Sensorsimulation bildet den GPU-basierten Anteil der Simulation. Dabei kommen gleichzeitig mehrere GPUs zum Einsatz, die durch eine oder mehrere SensCompute-Einheiten abgebildet werden. Die Simulation erfolgt mit einer Zykluszeit, die den abzubildenden Sensoren entspricht – etwa der Bildwiederholfrequenz der Kamera. Diese Zykluszeit ist in der Regel mindestens um eine Größenordnung höher als die der Fahrdynamiksimulation. Da der Detailgrad und der Realismus in der Sensorsimulation möglichst hoch sein soll, ist es dennoch technisch herausfordernd, während eines Sensorzyklus rechtzeitig neue Sensordaten bereitzustellen. Es ist daher entscheidend, die verfügbare

GPU-Rechenleistung und den Detailgrad der Simulation entsprechend der Echtzeitanforderungen auszubalancieren.

Die direkte Einspeisung der Sensordaten in die ECU erfolgt schließlich über ein oder mehrere Einheiten der Hardwarelösung SensInject, die speziell für diesen Einsatzzweck entwickelt wurde. Mit ihr lassen sich beispielsweise für Kamerasensoren die Imager-Emulation und Serialisierung der Sensordaten mithilfe von Gigabit Multimedia Serial Link (GMSL) vornehmen. Der Aufbau ist im Sinne eines Integrationsprüfstandes beliebig erweiterbar, beispielsweise mit Bremsen- oder Lenkungsprüfständen sowie Fahrsimulatoraufbauten.

Die simulationsbasierte Validierung automatisierter Fahrfunktionen wird somit auf der Zielhardware ermöglicht, gegebenenfalls auch im Zusammenspiel mit weiteren verbundenen Subsystemen im Fahrzeug. In der Regel stellt dies den letzten Schritt dar, bevor die Software auch im realen Fahrzeugprototyp auf dem Prüfgelände und im Feld erprobt wird. Der Hauptvorteil der HiL-Simulation besteht in der Möglichkeit, Tests mit einem großen Anteil realer Hardware vollständig reproduzierbar, in komplexen Szenarien sowie ohne Abhängigkeit von Ort und Umweltbedingungen durchführen zu können.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Simulation vollständiger Sensorcluster wird in naher Zukunft eine tragende Rolle während der Entwicklungs- und Testzyklen automatisierter Fahrzeuge einnehmen. Durch die Verwendung synthetischer Datensätze als Ergänzung zu den in der Realität aufgezeichneten Daten lassen sich Qualitätssteigerungen sowie Zeit- und Kostensparnisse erzielen. Dies gilt sowohl für das eigentliche Perzeptionssystem als auch für die Gesamtsystemvalidierung am HiL-Prüfstand.

Die Kombination aus der Simulationssoftware CarMaker, der Sensorsimulationsplattform SensCompute und den Echtzeitlösungen XPack4 und SensInject bildet eine durchgehende und erweiterbare Echtzeitsimulationsumgebung. Sie ermöglicht erhebliche Zeitsparnisse durch die Virtualisierung und Wiederverwendung von Modellen und Szenarien. Gleichzeitig führt die physikalische Sensor- und Fahrdynamiksimulation zu einem hohen Realitätsgrad der synthetischen Sensordaten und der virtuellen Fachversuche.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

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

# VISIONEN. ENTWICKLUNG. MOBILITÄT.

Die Welt der Mobilität verändert sich – die Herausforderung der Automobilentwicklung ist das Wissen von morgen mit Blick auf Technologien von übermorgen. Die Komplexität des Mobilitätswandels erfordert wegweisende Lösungen für den Transformationsprozess. ATZelektronik bietet hochaktuelle Informationen aus dem gesamten Spektrum der Automobilelektronik. Nutzen Sie zusätzlich zu den Printausgaben das **interaktive E-Magazin** und profitieren Sie von der einzigartigen **Wissensdatenbank** des Onlinearchivs mit pdf-Download.

# ATZ elektronik

60 TAGE  
KOSTENLOS!



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