

# Herausforderungen an die Diagnose

Integration der Diagnose in die Steuergeräteentwicklung

**Prof. Dr. Bernhard Rumpe**  
**Leiter Institut für Software Systems Engineering (SSE)**  
**Technische Universität Braunschweig**

**Dr. Jutta Schiffers**  
**Leiterin Systemfunktionen, Diagnose und Funktionssicherheit**  
**Systemarchitektur und -integration**  
**BMW AG München**

## Zusammenfassung

Automobilhersteller und ihre Zulieferer müssen sich in Zukunft immer größeren Herausforderungen bzgl. der Wartbarkeit und Qualitätssicherung Ihrer Fahrzeuge über den gesamten Entwicklungs- und Lebenszyklus stellen. Die rasant zunehmende Fahrzeugkomplexität, der enorm gestiegene Anteil an Software und der hohe Vernetzungsgrad der Einzelfunktionen erfordert die Entwicklung neuartiger Diagnosemethoden und die Einführung stringenter und durchgängiger Test- und Diagnose-Prozesse für den gesamten Entwicklungs- und Lebenszyklus des Fahrzeugs.

Für eine erfolgreiche und qualitativ hochwertige Diagnose müssen die Anforderungen von Entwicklung, Montage und Werk frühzeitig erfasst, integriert und in den Entwicklungsprozess eingeschleust werden. Dabei wird die Diagnose als verteilte Funktion mit hohem Onboard-Anteil und einem darauf aufsetzenden intelligenten Offboard-Analyseanteil betrachtet. Durchgängige Prozesse sorgen für die Bereitstellung der geeigneten Informationen zu jedem Entwicklungszeitpunkt. Durch eine intelligente Auswertung von Erfahrungswissen aus dem Feld kann die Diagnose, insbesondere von sporadisch auftretenden Fehlern, stark verbessert und weiterführend dieses Wissen in die Entwicklung zukünftiger Diagnosetechniken integriert werden.

Eine hochwertige und flächendeckende Diagnose hilft, die Kundenzufriedenheit weiter zu erhöhen und ist damit Ziel jeder Fahrzeugentwicklung.

In diesem Artikel werden die Herausforderungen einer zukünftigen Fahrzeugdiagnose skizziert und entsprechende Lösungsansätze diskutiert.

## Einleitung

Mit der zunehmenden Unterstützung des Fahrers durch Komfort- und Assistenzfunktionen wächst die Komplexität der Software in den einzelnen Steuergeräten und deren Vernetzung im Fahrzeug stark an. Dementsprechend erfordert die Diagnose derartiger Systeme besondere Aufmerksamkeit. War die bisherige „klassische“ Diagnose vorwiegend auf Verschleißteile oder Hardwareausfälle fokussiert, so muss sich die Diagnose der Zukunft in weitaus stärkerem Ausmaß mit den unterschiedlichen Softwarefehlern und deren Auswirkungen beschäftigen. Die Charakteristiken von Softwarefehlern unterscheiden



sich grundsätzlich von denen der verschleißorientierten Hardwareausfälle, weil Software nicht verschleißt, jedoch aufgrund der hohen Vernetzung Veränderungen an einzelnen Teilen der Software Auswirkungen auf das gesamte System haben können.

Die Komplexität der Software und der Vernetzung erhöht sich stetig. Damit steigen auch die Anforderungen an die Diagnose. In der Werkstatt sind viele, sogenannte „sporadisch auftretende“ Fehler nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand reproduzierbar. Störungs-/Ausfallursachen von Funktionen sind häufig schwer zu ermitteln, denn die meisten Funktionen im Fahrzeug sind verteilt und vernetzt. Ein Symptom hat oft mehrere Ursachen, und eine Ursache führt zu mehreren Symptomen. Ursache und Symptom sind vielfach zeitlich und/oder örtlich relativ lose korreliert und Folgefehler erschweren die Ursachenerkennung.

Die Erkennung und Behebung derartiger Fehler in Kombination mit der hohen Komplexität der Vernetzung bedarf neuer Maßnahmen und Methodiken und die Einführung stringenter, übergreifender Prozesse.

Betrachtet man den gesamten Entwicklungs- und Lebenszyklus, von der initialen Planung bis hin zum Recycling eines Fahrzeugs, so lassen sich sofort unterschiedliche Zielsetzungen erkennen, die die Diagnose in diesen Phasen zu erfüllen hat: Eine kostenoptimierte und fehlerfreie Entwicklung, die Bestätigung der Fehlerfreiheit des Fahrzeugs in der Produktion und die eindeutige Erkennung möglicher auftretender Fehler beim ersten Werkstattaufenthalt über die gesamte Lebensdauer. Besondere Aufmerksamkeit ist daher auf ein übergreifendes Anforderungsmanagement und ein gutes Monitoring der Diagnoseentwicklung über alle Entwicklungsphasen zu legen.

### **Ziele der Diagnose**

Wie schon erwähnt, haben Entwicklung, Produktion respektive Montage und Service unterschiedliche Zielansprüche an die Diagnose:

- **Ziel im Service: Effizientes Lokalisieren eines aufgetretenen Fehlers.**  
Den höchsten Stellenwert im Service hat die Kundenzufriedenheit. Ziel ist somit die Fehlerursache und die erforderliche Instandsetzungsmaßnahme beim ersten Werkstattaufenthalt innerhalb einer fest vorgegebenen Maximalzeit eindeutig zu identifizieren, um damit eine möglichst zeitsparende Reparatur durchführen zu können.,
- **Ziel in der Montage: Die Überprüfung des Fahrzeugs auf Fehlerfreiheit.**  
Die Montage nutzt derzeit noch vielfältige und teure Messtechnik zur Abprüfung auf den korrekten Verbau der Komponenten in der Fahrzeug-Montage. Ziel ist es daher die in den Fahrzeugen vorhandene Diagnose so mit dem Montageprozess zu verzahnen, dass die Diagnose weitgehend unabhängig von Ort und Verbauzustand (Montagephase) den korrekten Einbau der Steuergeräte überprüfen kann und damit den I.O.-Status, d.h. die Fehlerfreiheit dokumentiert.
- **Ziel in der Entwicklung: Die Diagnosefunktion ist Teil der Kundenfunktion.**  
Die Entwicklung hat grundsätzlich die Aufgabe eine frühzeitige Absicherung (Qualitätssicherung) aller Softwarefunktionen im Automobil zu erreichen. Da die Diagnose hochgradige Querschnittsfunktionalität besitzt, weil sie in jedem Steuergerät in ähnlicher Form integriert werden muss, liegt es nahe, Diagnose-

Funktionalität von vorneherein so auszulegen, dass damit Tests und Absicherung bereits im Entwicklungsprozess durchgeführt werden können.

Zusätzlich hat die Entwicklung Interesse, Methodiken zu entwickeln, die einen gesteuerten Rückfluss von Informationen aus den Servicestellen ermöglichen, der zur Verbesserung der Diagnose dienen kann. Insbesondere gilt dies für die Identifikation von meist sporadisch auftretenden Softwarefehlern, die in der Werkstatt nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand reproduzierbar sind.

Gleichzeitig ist jedoch zu beachten, dass die Entwicklung der Diagnose möglichst kostengünstig erfolgt.

Ziel des Diagnose-Ansatzes ist die Verbesserung der Qualität, die Senkung der Lifecycle-Kosten und als Hauptvorteil die maßgebliche Erhöhung der Kundenzufriedenheit. Dafür ist es geboten, die Diagnose über alle Ebenen und den gesamten Produktlebenszyklus methodisch und technisch intensiv zu integrieren. Daraus ergibt sich einerseits für die Entwicklung das Ziel, die Diagnosefunktion als Teil der Kunden-Funktion zu verankern und mit dieser abzusichern. Gleichzeitig müssen die Anforderungen von Montage und Service frühzeitig analysiert und in die zu entwickelnden Lösungskonzepte integriert werden. Zusätzlich sind neue stringente Prozesse aufzusetzen, die einen durchgängigen Informationsfluss zwischen Entwicklung, Montage und Service ermöglichen, um Diagnoseinformationen vollständig und zeitgerecht zur Verfügung zu stellen. Um aber eine nachhaltige Verbesserung in der Diagnose zu erhalten sind Messkriterien aufzusetzen und deren Entwicklung zu überwachen.

### **Messung der Diagnosequalität**

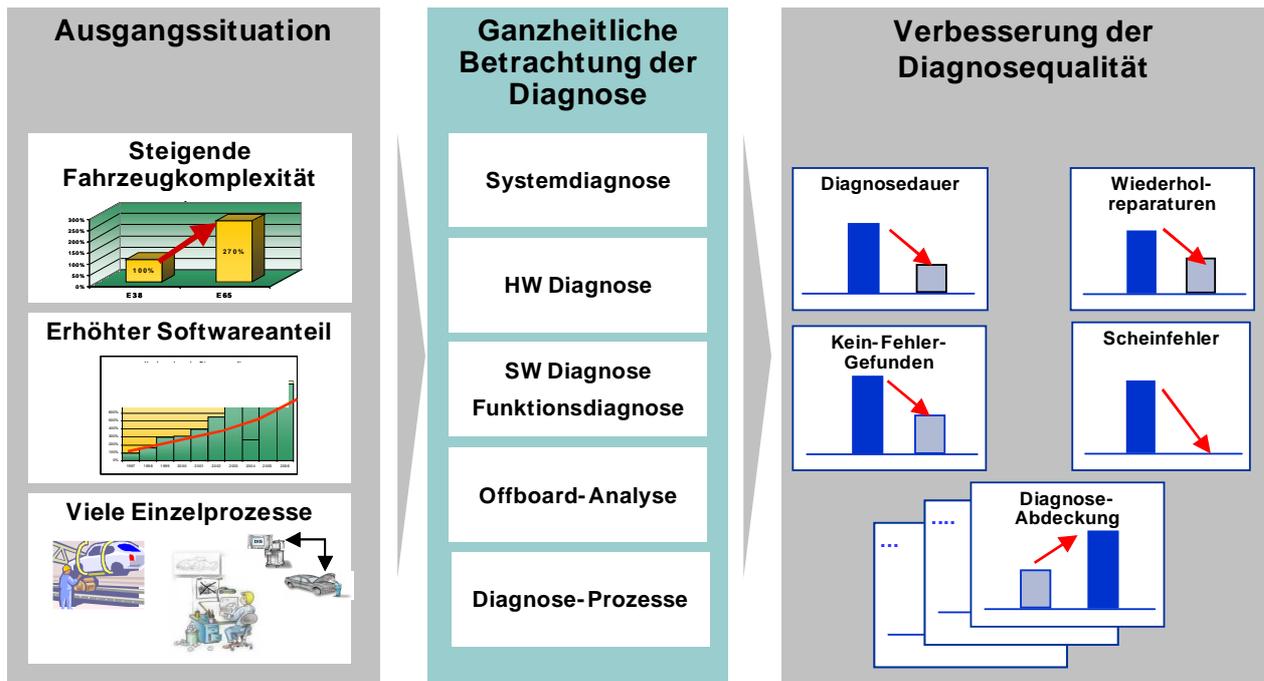
Als fundiertes Kriterium wurde die Diagnosedauer definiert, welche die mittlere Zeitdauer bis zum eindeutigen Finden der Fehlerursache angibt.

Die Anzahl der Wiederholreparaturen gibt an, wie oft eine Reparatur wiederholt werden muss, da die Fehlerursache beim ersten Reparaturversuch nicht behoben wurde. Dies wiederum ist ein Indiz für die nicht eindeutige Fehlerursachenerkennung der implementierten Diagnose.

Das Kriterium „Kein-Fehler-Gefunden“ gibt die Quote an, bei der ein Fehler nicht reproduzierbar ist und die Diagnose keine eindeutige Aussage über die Ursache zulässt.

Unter „Scheinflehlern“ versteht man Fehlerspeichereinträge, die keine Kundenauswirkungen haben, z.B. durch fehlerhafte Implementierung der Diagnose. Diese „Scheinflehler“ verwischen das Fehlerbild und führen oft zu falschen Handlungsanweisungen in den Werkstätten. In der Montage führen diese fehlerhaften Fehlerspeichereinträge zu einem erhöhten Nacharbeitsaufwand.

Die Abdeckung der Diagnose beschreibt die Vollständigkeit der Abbildung aller möglichen Fehler. Diese Kenngröße kann schon früh im Entwicklungsprozess gemessen und damit als direkte Steuerungsgröße für die Diagnosegüte im Entwicklungsprozess verwendet werden.

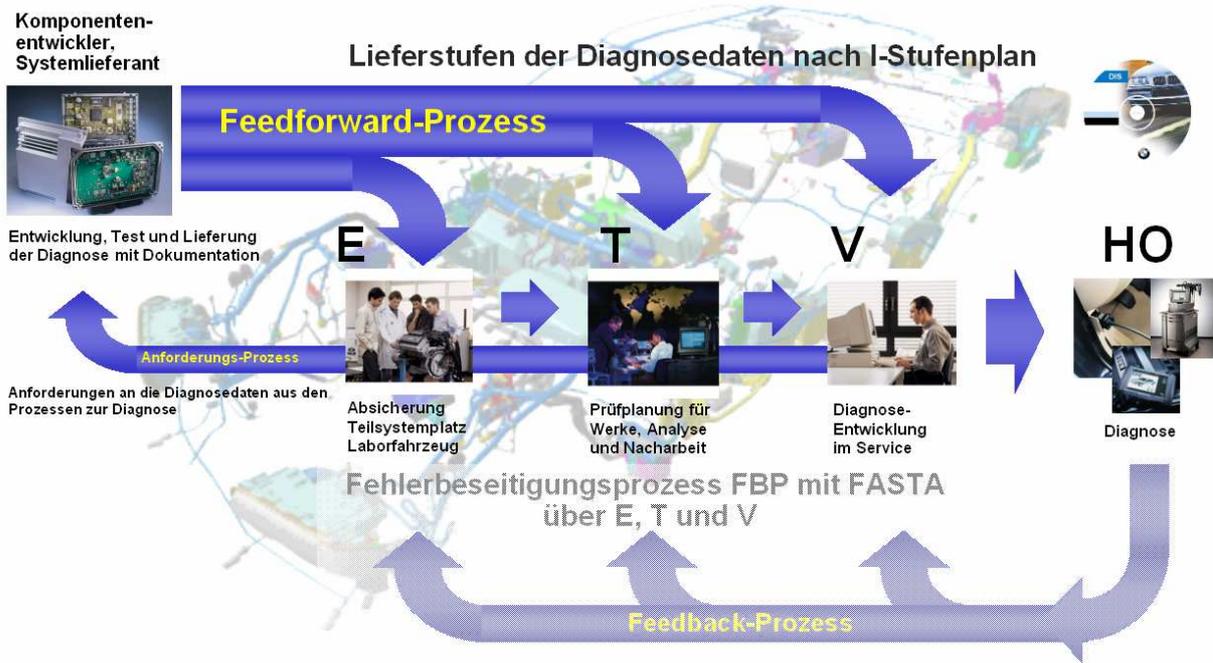


Zielsetzung der Diagnose

Ziel ist die Verbesserung der Diagnose über alle Ebenen und den gesamten Produktlebenszyklus

### Diagnose als Prozessthema

Die Entwicklung der Diagnosefunktionalität ist genauso wie die Auswertung der Diagnoseergebnisse ein Teil der Fahrzeugentwicklung. Ein für die Diagnose notwendiger „Feedforwardprozess“ beinhaltet neue Prozessaspekte für die Systementwicklung. Diese ermöglichen sowohl eine vollständige Formulierung der Anforderungen an die Diagnose für Produkt und Prozess als auch die Planung von Test und Lieferung der Diagnosedaten in den vereinbarten Lieferstufen. Gleichzeitig stellt dieser durchgängige Informationsfluss die vollständige Bereitstellung aller diagnose-relevanter Daten für die Folgeprozesse in Entwicklung, Vertrieb, und Produktion sicher. Darüber hinaus wird eine kontrollierte Rückführung von Erfahrungswissen in den Fehlerbeseitigungs- und Entwicklungsprozess durch einen zum Feedforwardprozess komplementären ebenfalls fest in den Gesamtprozess integrierten Feedbackprozess forciert.



### Diagnose als Prozess

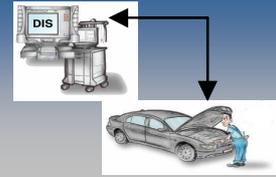
Die Diagnose-Prozesse steuern den Informationsfluss über die gesamte Prozesskette: Entwicklung → Produktion → Service

Begleitend dazu ist die Weiterentwicklung und Verwendung von Werkzeugen zur Sicherstellung der Diagnosequalität beim Entwickler und Zulieferer, zur Unterstützung der Erstellung von Diagnosedaten/-dokumentation und zur Integration von im Feld vorhandenen Expertenwissen in den für die Fahrzeug-Wartung verwendeten Diagnose-Tester notwendig.

### Diagnose als verteilte Funktion

Die Diagnose ist selbst eine sehr stark verteilte Funktion. Eine qualitativ hochwertige Diagnose setzt sich aus den im Fahrzeug implementierten zentralen und dezentralen Diagnosefunktionen und zusätzlichen, sehr detailliert prüfenden Routinen im externen Diagnose-Tester zusammen. Die Diagnose erstreckt sich über den gesamten Lebenszyklus des Produkts und damit organisatorisch über die Bereiche Entwicklung, Produktion/Montage und Service. Im Fahrzeug ist die Diagnose Bestandteil jeder einzelnen Kundenfunktion, ist damit über das gesamte Fahrzeug verteilt und hochgradig vernetzt.

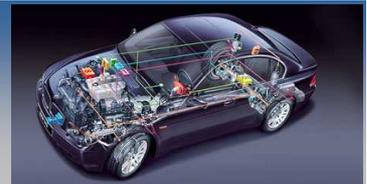
- Verteilt auf Onboard- (Fahrzeug) und Offboard-Anteile (Tester)



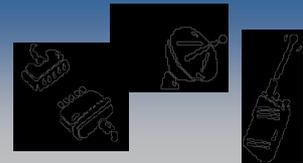
- Verteilt über Organisationseinheiten: Entwicklung, Produktion, Service



- Verteilt über das Fahrzeug
  - Zentrale und dezentrale Anteile
  - System-/Busdiagnose



- Verteilt auf Technologien/Methodiken: Hardware- und Softwarebasiert



Diagnose als verteilte Funktion  
Die Diagnosefunktion ist auf vielfältige Weise verteilt.

### Systemdiagnose

Der im Fahrzeug integrierte zentrale Diagnose-Master dient zur Sammlung und Auswertung von diagnoserelevanten Umwelt-Daten. Er bietet dafür Basisfunktionalitäten die zumindest konzeptuell als Teil des Betriebssystems jedes Steuergeräts zu sehen sind.

Durch eine Kennzeichnung der einzelnen Fehlerspeichereinträge mit einem fahrzeugweit einheitlichen Zeitstempel können Fehlersymptom (Kundenauswirkung) und Fehlerursache korreliert und zusätzlich dazu der interne Status des Fahrzeugs gespeichert werden.

Die Datensammlung unter anderem von Buslastmessungen, Bustraces, zusätzlicher zentraler Fehlerkontexte und Umweltbedingungen ermöglichen die Reproduzierbarkeit des Fehlers und helfen damit bei der Analyse und Identifizierung der Fehlerursache.

Die für die Entwicklung und Montage notwendige temporäre Onboard-Datenauswertung beinhaltet zum Beispiel die Anzeige von Analyse- und Zustandsdaten und die Erkennung und Ausblendung der nur aufgrund des Verbauzustands auftretenden Fehler.

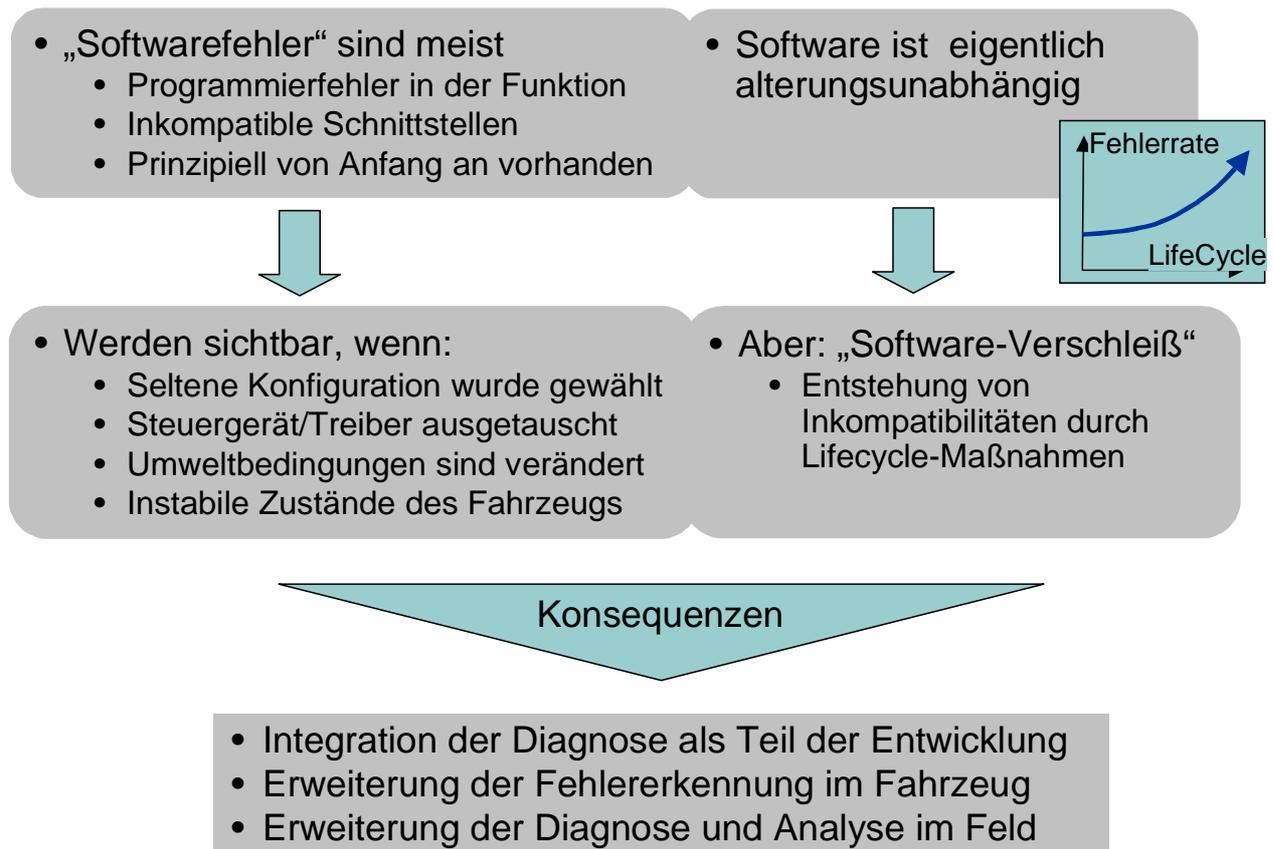
Durch den stark anwachsenden Softwareanteil in den Kundenfunktionen erweitert sich die klassisch hardware-orientierte Diagnose mehr und mehr Richtung Erkennung von Softwarefehlfunktionen.

## **Diagnose von Softwarefehlern**

Die bereits erwähnte Zunahme der Komplexität von Funktionen und deren Vernetzung mit und den vielen Konfigurationsmöglichkeiten führt dazu, dass es immer unwahrscheinlicher wird, dass die im Fahrzeug verbauten Steuergeräte frei von Softwarefehlern sind.

Als „Softwarefehler“ bezeichnet man dabei sowohl die eher selten auftretenden Programmierfehler innerhalb einzelner Steuergeräte als auch die wesentlich häufiger auftretenden Protokoll-Inkompatibilitäten an den Bussystemen. Softwarefehler sind normalerweise alterungsunabhängig: Im Prinzip sind sie bereits bei Produktionsbeginn vorhanden, treten jedoch nur unter speziellen Umständen auf. In der Praxis zeigt sich aber, dass viele Softwarefehler erst durch „Software-Verschleiß“ entstehen. Im Lebenszyklus eines Fahrzeugs werden Tauschgeräte eingesetzt, oder im Produktionsprozess ein Gleichteil ersetzt. Dabei können Inkompatibilitäten entstehen, die erst mit der Hinzunahme von neuen Varianten von Hardwareteilen entstanden sind und damit zur Entwicklung des Produkts noch gar nicht erkennbar waren. Um diese Probleme zu vermeiden, ergibt sich deshalb notwendigerweise, dass die Diagnose sowohl als integraler Teil der Entwicklung zu sehen ist, als auch bei der Aktualisierung von Hardware-Varianten einzubeziehen ist.

Idealerweise werden Softwarefehler bereits a priori durch softwaretechnische Maßnahmen bei der Entwicklung vermieden. Dafür sind zum Beispiel intensive, automatisierte Tests von Anwendungsfällen, Variabilitätstests und analytische Untersuchungen der Protokollschichten besonders Erfolg versprechend. Die Diagnose im Fahrzeug muss Software- und Hardwarefehler unterscheiden lernen, wie bereits besprochen, erweiterte Fehlerbilder zur Rekonstruktion des Fehlerkontexts und zur Lokalisation der Fehlerquelle verfügbar machen, sowie den Offboard-Diagnoseprozess explizit unterstützen. Für die Offboard-Diagnose eines Fahrzeugs ist die Wiederverwendung der Anwendertests wesentliches Kernelement. Der Diagnose-Tester simuliert in Zukunft die in der Entwicklung erstellten Anwendungsfälle und prüft deren Funktionalität. Er erkennt so auch die Inkompatibilitäten spezieller Konfigurationen.



Diagnose von Softwarefehlern

Die Erkennung von Softwarefehlern ist in hoch-vernetzten und verteilten Systemen sehr komplex

Die bisher genutzte Fehlererkennung muss deshalb um Kontextwissen erweitert werden. Ziel ist die geeignete Abstraktion der Umwelt, des Fahrerverhaltens und des Busverhaltens, um mit möglichst wenig zusätzlichem Speicheraufwand genügend Information zur eindeutigen und effizienten Fehlererkennung zu erhalten.

### Diagnose und robuste Software

Auftretende Verschleißerscheinungen in der Hardware können (mit Ausnahmen) nur durch Auswechseln oder Reparatur der Hardware behoben werden. Software ist hingegen immateriell und dort auftretende Fehler (im Sinne interner fehlerhafter Codes) können durch robuste Implementierungen so korrigiert werden, dass für den Fahrer tatsächlich kein Fehlverhalten erkennbar wird. Im Bereich der Informatik existieren eine Reihe sehr verbreiteter Verfahren für eine robuste Implementierung. Dazu gehören je nach Kritikalität und Komfortverlust redundante Realisierungen, Watchdogs und explizites Fehlermanagement innerhalb einer Komponente sowie die Überwachung und Re-Initialisierung eines Steuergeräts durch ein benachbartes. Diese Funktionalität kann zukünftig auch eine Erweiterung des Diagnose-Masters übernehmen. Ein deutlicher Teil dieser Robustheit kann eben nur dadurch realisiert werden, dass auftretende Fehlverhalten erkannt werden und darauf entsprechend reagiert wird. Dementsprechend ist die Software-Diagnose ein vitaler Bestandteil zur robusten Absicherung von Fahrzeugfunktionen

## **Modellbasierte Diagnose**

Diagnose beschränkt sich aber nicht nur auf Elektrik- und Elektronik-Umfänge bzw. die dazugehörige Software, sondern auch mechanische bzw. mechatronische Systeme können mittels neuer, modellbasierter Diagnosemethodiken erfasst werden. Die modellbasierte Fehlererkennung wertet Eingangs- und Ausgangssignale parallel aus und vergleicht sie mit den zugrundeliegenden Modellen des erwarteten Verhaltens. Diese Modelle können signalbasiert als auch prozessbasiert sein. Der Vergleich des Verhaltens der realen Fahrzeugkomponenten mit dem Modell für das normale Verhalten liefert Informationen, die mittels Paritätsgleichungen und Parameterschätzverfahren in spezifische Merkmalsvektoren überführt werden können. Änderungen dieser Merkmalsvektoren sind Symptome, die zur Fehlerdiagnose verwendet werden können. Hierbei können von einfachen Mustererkennungsverfahren bis zu Fuzzy-Logik und Neuronalen Ansätzen unterschiedlichste Verfahren zum Einsatz kommen. Derzeit ist der Einsatz dieser Methodik auf einige wenige Einsatzgebiete begrenzt, Z.B. die Erkennung von Zündaussetzern oder die Diagnose hydraulischer Bremssysteme, jedoch sind die Ergebnisse sehr vielversprechend.

## **Zusammenfassung und Fazit**

Diagnose war bisher immer vor allem Diagnose von Verschleißteilen, d.h. sehr hardwarelastig. Mit der zunehmenden Komplexität der im Fahrzeug verbauten Software ist auch dem Software-Verschleiß Rechnung zu tragen. Innovative Konzepte zum kostengünstigen Ausbau der Diagnosefunktionalität und eine ganzheitliche Integration der Diagnose in den Entwicklungsprozess helfen die Diagnosequalität zu sichern. Stringente und durchgängige Prozesse sind elementar für den Erfolg der Diagnose. Durch eine Rückführung des Erfahrungswissens aus dem Service kann die Diagnose insbesondere von sporadischen, durch Software verursachten Fehlern stark verbessert werden. Gleichzeitig wird der Umfang der bisherigen Diagnose auf mechatronische Systeme ausgeweitet, wobei auch hier wiederum modellbasierte Methodiken auf Softwarebasis eingesetzt werden. Eine effiziente und effektive Diagnose vermindert die Service-Kosten und erhöht gleichzeitig die Kundenzufriedenheit und ist somit Ziel jeder Fahrzeugentwicklung.