
Neue Testmethoden für vernetzte Kraftfahrzeugelektronik im Labor und Fahrversuch

Dr.-Ing. Gerd Baumann, Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen
und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)

Zusammenfassung

Beim Test von elektronischen Steuergeräten und Embedded Software für Kraftfahrzeuge wird eine Vielzahl von Methoden eingesetzt, die sich in den einzelnen Entwicklungsphasen der Elektronik für ein neues Kraftfahrzeug signifikant unterscheiden. Heute sind diese Verfahren sowie die eingesetzten Geräte und Software-Werkzeuge häufig nicht miteinander kompatibel, so dass ein Austausch von Testabläufen zwischen den Fachabteilungen beim Automobilhersteller sowie mit den Zulieferern schwierig oder sogar unmöglich ist.

Im ersten Teil dieses Beitrags werden die bekannten Testverfahren für Kfz-Elektronik und Software vorgestellt und bezüglich ihrer Eignung für unterschiedliche Testaufgaben bewertet. Anschließend wird ein neuer Ansatz vorgestellt, der als teilparalleler Verbundtest bezeichnet wird. Diese Testmethode ist gleichermaßen für Einzel-Steuergerätestests und Steuergeräte-Verbundtests geeignet und kann sowohl im Labor als auch im Fahrversuch angewendet werden. Abschließend wird eine praktische Realisierung dieses Ansatzes bei einem OEM beschrieben.

Abstract

Within the test of electronic control units and embedded software for motor vehicles a wide variety of methods is used. These methods differ significantly in the individual development phases of the electronics for a new vehicle. Today these methods as well as the assigned testing hardware and software tools are frequently not compatible with one another. Therefore the exchange of test descriptions and test results between the divisions of a car manufacturer which are involved in the testing process is typically difficult or even impossible.

In the first part of this paper the established testing methods for automotive electronics and software are introduced and evaluated with respect to their suitability for different test tasks. Subsequently a new approach is presented, the so-called semi-parallel composite test. This method is suitable for testing both single and networked ECU's. It is applicable for lab tests of electronics, but also for road trial. Finally a practical implementation of this approach at an OEM is described.

1 Einführung

1.1 Der Testbegriff

Der Begriff „Test“ hat eine lange Entwicklungsgeschichte. Abgeleitet aus dem lateinischen Wort *testa* (irdenes Geschirr, Topf, Schale) wurde im Mittelalter mit *test* ein kleiner Schmelztiegel bezeichnet, in dem Metalle durch Schmelzen auf ihre Qualität und Reinheit geprüft wurden, also ein frühes Prüfgerät. Seit dem 16. Jahrhundert wird der Begriff *Test* in vielen europäischen Sprachen in seiner heutigen, allgemeinen Bedeutung gebraucht [1]. Der *Duden* erklärt *Test* mit *Probe, Prüfung, Experiment, Untersuchung*. Wir haben es also mit einem Begriff zu tun, der international bekannt ist. Trotzdem soll der Begriff *Test* hier nochmals exakt definiert werden:

Durch einen Test wird festgestellt, ob die Eigenschaften einer Sache von den Erwartungen abweichen.

Diese Definition beinhaltet keine absolute Bewertung der zu prüfenden Sache im Sinne von „gut“ oder „schlecht“, obwohl dies häufig mit dem Begriff *Test* assoziiert wird. Vielmehr fordert die Definition lediglich einen Vergleich zwischen Ist- und Sollverhalten der zu prüfenden Sache. Demzufolge lautet das Ergebnis eines Tests stets „bestanden“ oder „nicht bestanden“.

Das Nicht-Bestehen eines Tests deutet demzufolge nicht zwangsläufig darauf hin, dass die Sache „schlecht“ ist, sondern kann andere Ursachen haben:

- Die Erwartungen an die Sache wurden zu hoch angesetzt,
- die Test-Rahmenbedingungen waren ungünstig gewählt oder
- die Test-Ausrüstung ist fehlerhaft

Es gibt zwei grundlegende Sichtweisen, welchem Zweck Tests dienen.

Sichtweise a):

Tests dienen dem Nachweis, dass die Eigenschaften eines Produkts unter allen denkbaren Betriebsbedingungen mit den spezifizierten Eigenschaften übereinstimmen.

Im Bereich der Softwaretechnik gilt es als gesichert, dass ein solcher *Nachweis der vollständigen Korrektheit* der Implementierung eines gegebenen Algorithmus aus verschiedenen Gründen nicht möglich ist, z.B. [2].

In der Realität ist dies durch die folgenden Punkte begründet:

- Die Zeit, die zum Testen zur Verfügung steht, ist endlich (bzw. immer zu kurz) und
- es existiert niemals eine Spezifikation, die den Prüfling vollständig beschreibt

Diese Aussage gilt auch für elektronische Steuergeräte, da diese stets Software enthalten und deren Verhalten in hohem Maße durch Software bestimmt wird. Dieser Ansatz ist also im Bereich der Kfz-Elektronik nicht sinnvoll.

Sichtweise b):

Tests dienen dem Auffinden möglichst vieler Fehler in einem Testobjekt.

Dabei gilt:

Ein Fehler ist jede Abweichung der tatsächlichen Ausprägung eines Qualitätsmerkmals von der vorgesehenen Soll-Ausprägung [3].

Mit anderen Worten: Da das „Null-Fehler-Ziel“ für komplexe Systeme stets unerreichbar ist, sollten Tests dazu eingesetzt werden, um die Anzahl der Fehler zu minimieren. Diese pragmatische Zielsetzung ist für die Kfz-Elektronik geeignet.

1.2 Testphasen und Testaktivitäten

Anhand von Bild 1 werden die drei wesentlichen Phasen und die jeweils dazu gehörigen Aktivitäten eines Testprozesses für technische Systeme erläutert.

Testvorbereitung („Pre-Processing“):

Während dieser Phase, die sich in mehrere Arbeitsschritte unterteilen läßt, werden alle für die Testdurchführung notwendigen Informationen ermittelt und die erforderlichen Gerätschaften bereitgestellt. Grundlage der Testvorbereitung ist stets ein Lastenheft (= Spezifikation), in dem die gewünschten Eigenschaften des zu testenden Produkts mehr oder weniger exakt festgelegt sind. Hierbei ist es zunächst unerheblich, ob das Lastenheft schriftlich, d.h. in formaler oder natürlicher Sprache, formuliert ist oder nur mündlich innerhalb des Entwicklungsteams kommuniziert wird. Folgende Schritte werden durchlaufen:

- Festlegung der Testziele für den konkreten Prüfling (Was soll getestet werden? Nach welcher Art von Fehlern soll vorrangig gesucht werden?).
- Festlegung des Testverfahrens (z.B. Black-Box/White-Box, etc.). Dazu gehört auch die Beschaffung der Testausrüstung.
- Ableitung einer Testreferenz, welche für jeden Satz von Eingabewerten (Stimuli) die korrekte Ausgabe des Prüflings in Form von Soll- oder Grenzwerten erzeugt. Die Testreferenz wird auch als *Orakel* bezeichnet.
- Definition einzelner Testfälle, d.h. der detaillierten Test- Durchführungs- und Auswertungsvorschriften. Dabei ist jeder im Lastenheft enthaltenen Anforderung mindestens ein Testfall zuzuordnen.

Testdurchführung:

- Initialisierung des Prüflings: Sicherstellen, dass der Prüfling sich in einem bekannten Anfangszustand befindet. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die Gültigkeit des Tests.
- Stimulation des Prüflings, d.h. Beaufschlagen der Eingänge mit physikalischen oder logischen Signalen.
- Durchführung von Messungen oder Beobachtungen am Prüfling.

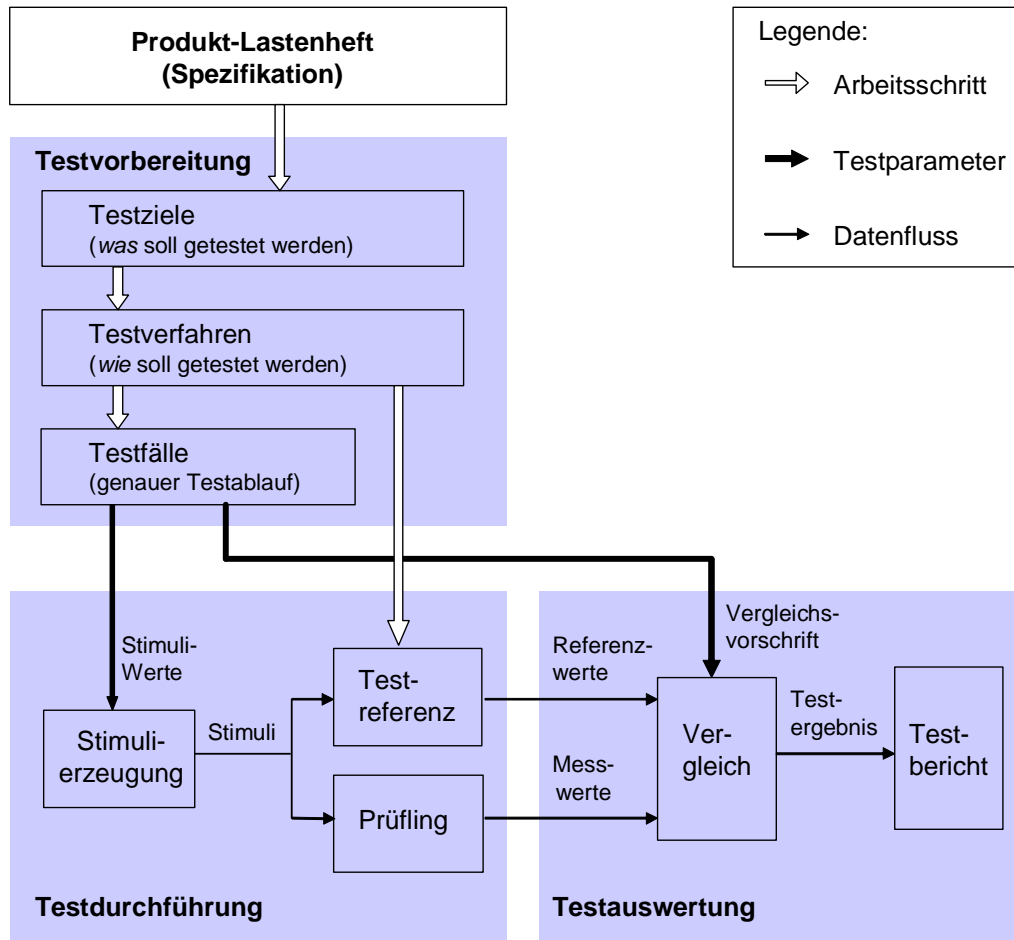


Bild 1: Testphasen und Testaktivitäten

Testauswertung:

- Vergleich der Ausgabewerte des Prüflings (Messwerte) mit den Ausgabewerten der Testreferenz (Referenzwerte) anhand einer Vergleichsvorschrift,
- Ableitung des Ergebnisses (Test bestanden oder nicht bestanden), sowie ergänzender Informationen zu Art und Umfang der Abweichung,
- Dokumentation dieser Ergebnisse (Eintragen in einen Testbericht).

1.3 Testebenen

Für einen effektiven Testprozess muss frühzeitig festgelegt werden, welche Arten von Tests zu welcher Zeit vorgenommen werden und wer dafür verantwortlich ist. Dabei gilt es einerseits, eine angemessene Testabdeckung zu erzielen, andererseits jedoch Mehrfach-Tests zu vermeiden. Diese Aufgabe ist alles andere als trivial, vor allem im Hinblick auf den hohen Vernetzungsgrad der Automobilelektronik und die große Zahl der Zulieferer, deren Produkte in einem modernen Kraftfahrzeug optimal zusammenwirken müssen.

In der Automobilindustrie hat sich das in Tabelle 1 dargestellte Vorgehensmodell durchgesetzt, welches in dieser oder ähnlicher Form von den OEMs und den großen Zulieferern eingesetzt und weiterentwickelt wird, wobei im Einzelfall weitere Ebenen eingeführt oder mehrere Ebenen zusammengefasst werden.

Tabelle 1: Testebenen in der Kraftfahrzeugelektronik

Testebene	Testobjekte	Testverfahren (Beispiele)	Zuständigkeit
Fahrzeugtest	Fahrzeug mit vollständiger Elektronik	Fahrversuch mit Datenlogging Subjektive Wertung „EMV-Halle“	OEM, Zentralabteilung
Gesamtverbund-Test im Labor	Alle ECUs eines Fahrzeugs incl. Gateways	„CAN-Mobil“	OEM, Zentralabteilung
Teilverbundtest	Alle ECUs eines Bussegments, z.B. Antriebsstrang	HIL-Verbundtester „Brettaufbau“	OEM, Fachabteilung
Einzel-ECU-Test	ECU mit Software, evtl. mit Peripherie	Fail-Safe-Tester, HIL	OEM Zulieferer
Software-Integrationstest	Alle Softwareteile einer ECU	Code Coverage	Zulieferer
Software-Modultest	Einzelne Funktion oder Code-Modul	Code Review Metriken	Zulieferer

1.4 Testhierarchie

Für eine planmäßige Vorgehensweise empfiehlt sich eine hierarchische Strukturierung der Testabläufe. In Anlehnung an die in der Informationstechnik üblichen Begriffe wird für die Kraftfahrzeugelektronik folgende, mehrstufige Testhierarchie vorgeschlagen, die sich sowohl

für den Test von Embedded Software als auch für den Steuergerätetest bewährt hat. Diese Testhierarchie ist in Bild 2 dargestellt.

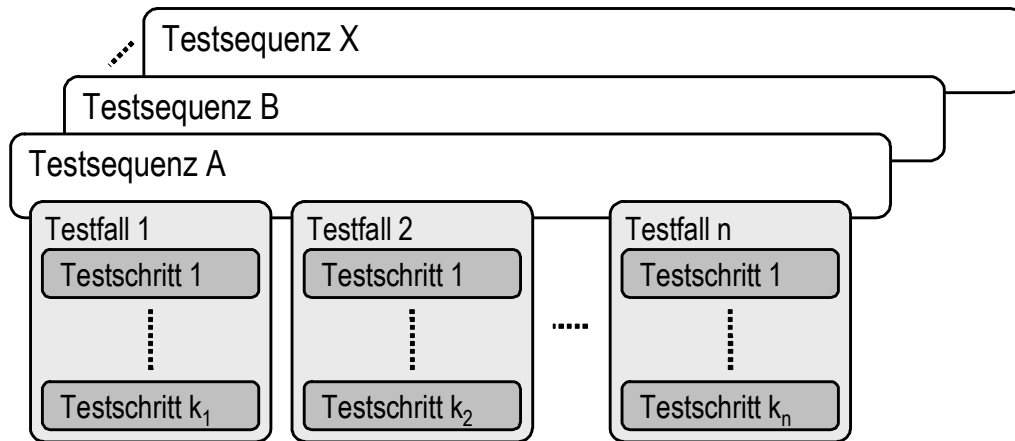


Bild 2: Hierarchischer Aufbau von Testabläufen

Im Mittelpunkt der Betrachtung steht der *Testfall*. Mit einem Testfall wird ein einzelner Pfad in der Software außerhalb oder innerhalb des Steuergerätes getestet, z.B. die Aktivierung einer einzelnen Funktion. Ein solcher Testfall besteht aus mehreren Operationen zur Erzeugung der Stimuli, Messung der Ausgangsgrößen sowie Auswertung und Dokumentation des Testergebnisses. Diese Operationen werden als *Testschritte* bezeichnet, die die „atomaren“ Bausteine eines Testablaufs bilden. Bei werkzeuggestützten Testsystemen steht eine Bibliothek solcher Testschritte zur Verfügung, z.B. in Form des Befehlssatzes einer Skriptsprache.

Der vollständige Test z.B. eines kompletten Software-Moduls oder einer ECU besteht aus einer Abfolge mehrerer, in der Regel zahlreicher, Testfälle. Diese werden zu einer *Testsequenz* zusammengefasst. Mehrere dieser Testsequenzen können wiederum zu einer Testsequenz höherer Ordnung zusammengefügt werden, z.B. für den Test mehrerer ECUs in einem Verbund.

Diese hierarchische Test-Strukturierung, die von verschiedenen marktgängigen Test-Werkzeugen unterstützt wird, sorgt für Übersichtlichkeit und korreliert mit den im vorherigen Abschnitt dargestellten Testebenen.

2 Klassifikation der Testverfahren

2.1 White-Box-, Black-Box- und Grey-Box- Testverfahren

Mit dieser Klassifikation der Testverfahren wird unterschieden, ob und in welchem Maße die interne Struktur des Prüflings bekannt ist, und auf welche Schnittstellen beim Testen zugegriffen wird.

2.1.1 White-Box-Test

White-Box-Tests (zutreffender auch *Clear-Box-Tests* genannt) erfordern die vollständige Kenntnis der internen Struktur des Prüflings. Für den Test von Software bedeutet dies, dass der Quellcode verfügbar sein muss. Eingesetzt werden White-Box-Tests vor allem für Software-Modultests. Die wichtigste Zielsetzung ist dabei die vollständige Abdeckung aller Pfade und Anweisungen (*code coverage*). Unterschiedliche Pfade ergeben sich durch Verzweigungen und Schleifen (z.B. if, while, ...) in Abhängigkeit von Variablen oder Konstanten. Jeder mögliche Pfad des Softwaremoduls und folglich auch jede einzelne Anweisung soll mindestens einmal durchlaufen werden. Dabei wird einerseits überprüft, ob die Ausgabegrößen der Software plausibel sind, andererseits sollen Implementierungs- und Laufzeitfehler wie Speichermangel, Variablen-Überläufe, fehlerhafte Typumwandlungen, nicht erreichbare oder nicht verlässbare Pfade etc. entdeckt werden.

White-Box-Tests sind in hohem Grade automatisierbar. Dies ist auch unabdingbar, da die Anzahl der möglichen Pfade mit jeder Verzweigung exponentiell ansteigt. Es existiert eine große Bandbreite von Testverfahren und Werkzeugen, die im Bereich der Informatik entwickelt wurden. Einzelheiten zu den einzelnen Methoden finden sich z.B. in [4] und [5].

Auf dem Gebiet der Kraftfahrzeugelektronik werden White-Box-Tests typischerweise beim Zulieferer durchgeführt, da der OEM in der Regel keinen Zugriff auf den Quellcode von Steuergeräte-Software hat (es sei denn, er entwickelt diesen selbst).

2.1.2 Black-Box-Test

Beim Black-Box-Verfahren werden die Tests ohne Zugriff auf interne Größen des Prüflings durchgeführt.

In der Kraftfahrzeugelektronik werden Black-Box-Tests auf allen Testebenen angewendet, d.h. für Software, für Einzel-Steuergeräte, mehrere Steuergeräte im Verbund bis zum vollständigen Fahrzeug.

In der Regel ist die interne Struktur des Prüflings (z.B. der elektrische Schaltplan einer ECU oder der Quellcode der eingebetteten Software) beim Black-Box-Test nicht oder nur in groben Zügen bekannt. Deshalb wird der Prüfling an seinen Eingangs- Schnittstellen mit einer Auswahl an Testsignal-Kombinationen (auch als *Testvektoren* bezeichnet) beaufschlagt. Anschließend wird festgestellt, ob die Ausgangssignale plausibel sind. Black-Box-Verfahren sind somit stets funktionsorientiert.

Da die Menge der möglichen Eingangssignalkombinationen bei umfangreichen Systemen sehr hoch ist, werden Black-Box-Tests typischerweise stichprobenartig durchgeführt.

Eine übliche, systematische Vorgehensweise beim Black-Box-Test ist die *Äquivalenzklassenbildung*. Hierbei werden alle Eingangssignale in Intervalle eingeteilt. Bewegt sich ein Eingangssignal innerhalb eines dieser Intervalle, so tritt keine Änderung an den Ausgängen des Prüflings auf. Die Anzahl der möglichen Eingangssignal-Kombinationen ergibt sich dadurch aus der Kombinatorik dieser Äquivalenzklassen. Eine Sonderform der Äquivalenzklassenbildung ist die *Grenzwertanalyse*. Die Intervallgrenzen liegen hierbei stets an den Grenzen zwischen gültigen und ungültigen Wertebereichen von Eingangssignalen. Dieses Verfahren ist von hoher praktischer Bedeutung, z.B. um das Verhalten eines Steuergeräts bei ungültigen Sensorsignalen zu überprüfen (*Fail-Safe-Tests*).

Eine in der Automobilelektronik bekannte und von verschiedenen Werkzeugen unterstützte Implementierung der Äquivalenzklassenbildung stellt die *Konfigurationsbaum-Methode* dar, die z.B. in [6] auf Embedded Software angewandt wird.

2.1.3 Grey-Box-Test

Der im vorherigen Abschnitt beschriebene Black-Box-Test stößt in der Praxis auf erhebliche Schwierigkeiten, weil die Spezifikation das *Ein-/Ausgangsverhalten* des Prüflings nur selten hinreichend exakt beschreibt. Die stets vorhandene Spezifikation der Art und Wertebereiche von Ein- und Ausgangssignalen ist nicht ausreichend, da das Gesamtverhalten nicht nur von den Eingangsgrößen, sondern auch von inneren *Zustandsgrößen* des Prüflings abhängt, deren Werte beim Black-Box-Test definitionsgemäß nicht bekannt sind.

Solche Zustandsgrößen treten immer dann auf, wenn das betrachtete System ein eigenes Zeitverhalten aufweist. Betrachtet man ein Steuergerät, so besitzt sowohl die Hardware als auch die Software Zustandsgrößen. Bei der Hardware sind diese z.B. Spannungen und Ströme in einem analogen Filter oder der Betriebsmodus eines CAN-Transceivers. Beispiele für Software-Zustandsgrößen ist der Wert eines Zählers oder der Integral-Anteil eines Reglers. Diese Größen beeinflussen den internen Programmablauf, also die Auswahl der bereits erwähnten Software-Pfade, und damit auch die Ausgangsgrößen.

Deshalb ist es von entscheidender Bedeutung, dass sichergestellt wird, in welchem Betriebsmodus sich der Prüfling gerade befindet. Dies kann z.B. dadurch erreicht werden, indem der Prüfling zu Beginn eines Tests durch einen Reset in einen definierten Ausgangszustand versetzt wird. Bei einer ECU kann dies zum Beispiel durch Aus- und Einschalten der Stromversorgung („Klemme 30“) erreicht werden. Anschließend muss das Steuergerät durch genau definierte Werte-Abfolgen an den Eingängen in den Betriebsmodus versetzt werden, für den Tests durchgeführt werden sollen, was in der Realität sehr aufwendig und manchmal kaum möglich ist.

Abhilfe schafft das Grey-Box-Verfahren, das eine Mischform aus Black-Box- und White-Box-Test darstellt. Zusätzlich zu den Ein-/Ausgangsbeziehungen wird eine Auswahl von internen Zustandsgrößen beschrieben, auf die im Testablauf sowohl lesend als auch schreibend zugegriffen werden kann.

Beim Steuergerätetest gibt es hierbei unter Anderem folgende Möglichkeiten:

- Auslesen von Fehlercodes über die Diagnose-Schnittstelle,
- Zugriff auf ECU-interne Messwerte und Applikationsparameter über Diagnose- und Applikations-Schnittstellen,
- explizite Bereitstellung ausgewählter interner Zustandsgrößen über eine eigene Schnittstelle für Entwicklungszwecke („Entwicklungs-CAN-Bus“) und
- explizite Aktivierung ausgewählter Software-Funktionen, z.B. so genannter Stellgliedtests über Diagnose-Services.

Mit Hilfe dieser Zusatzinformationen kann in vielen Fällen der augenblickliche Betriebszustand der ECU hinreichend genau ermittelt oder ein Modus explizit angefahren werden. Geeignete Diagnose- und Applikationsschnittstellen sowie Softwarewerkzeuge sind für diesen Zweck verfügbar. Das Grey-Box-Verfahren findet daher in der industriellen Praxis breite Anwendung für Steuergeräte-Tests.

2.2 Open-Loop- und Closed-Loop- Testverfahren

2.2.1 Closed-Loop-Verfahren

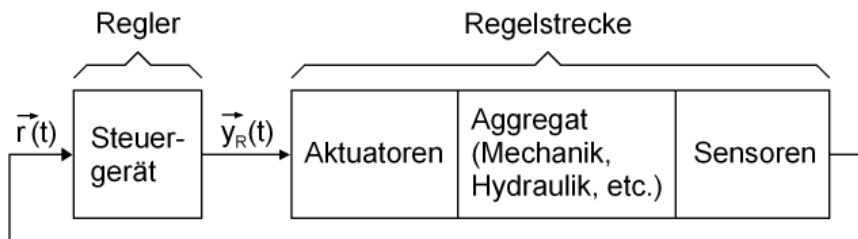


Bild 3: Regelkreis für ein elektronisch geregeltes Kfz-System

Im Laufe der vergangenen zehn Jahre hat sich eine Reihe von Testverfahren etabliert, bei denen der Prüfling in einer synthetischen Umgebung betrieben wird, die die Realität (z.B. ein Fahrzeug) durch eine Simulation möglichst exakt nachbildet. Wenn sich hierbei ein geschlossener Regelkreis ergibt (Bild 3), so handelt es sich um ein „Closed-loop-“ bzw. „In-the-Loop“-Verfahren.

In Bild 4 sind die verschiedenen Varianten und deren Anwendungen dargestellt. Die Verfahren unterscheiden sich dadurch, dass der Regler und die Regelstrecke jeweils real (im Bild durchgezogen dargestellt) oder simuliert (strichliert) sein können [7].

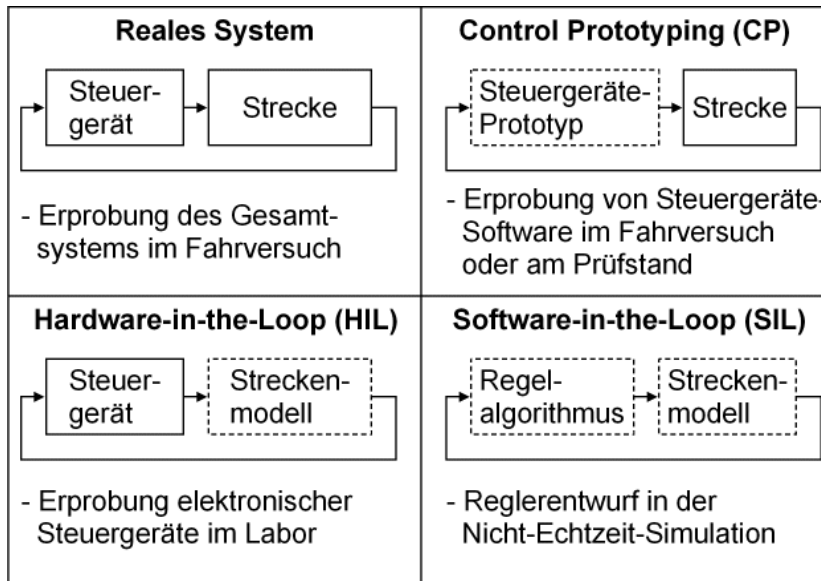


Bild 4: Einteilung der Testverfahren nach der Repräsentation von Steuergerät und Regelstrecke.

Daneben hat sich noch der Begriff *Model-in-the-Loop* etabliert. Hierbei wird der Regelalgorithmus in einem Modellierungswerkzeug mit graphischem Editor (z.B. SIMULINK oder ASCET) abgebildet und im Regelkreis mit einem Streckenmodell betrieben. Es handelt sich dabei um eine Variante des Software-in-the-Loop-Verfahrens, da die erwähnten Softwarewerkzeuge streng genommen eine Software-erstellung auf höherer Abstraktionsebene ermöglichen, wobei durch „Autocoding“ eine Generierung von Quellcode ermöglicht wird, meistens in der Programmiersprache C.

Eine detaillierte Untersuchung zum HIL-Verfahren findet sich z.B. in [8].

2.2.2 Abgrenzung zum Open-Loop-Test

Die im Folgenden beschriebene Unterscheidung der Testverfahren in Open-Loop- und Closed-Loop-Verfahren wird in der Fachliteratur und in der Test-Praxis häufig vernachlässigt. Ein Grund dafür ist, dass sich im Automobil-Umfeld der Begriff *Hardware-in-the-Loop* für eine Vielzahl von Testverfahren etabliert hat, bei denen elektronische Steuergeräte an einer Testmaschine im Labor geprüft werden. Da diese Unterscheidung jedoch nicht nur theoretischer Natur ist, soll darauf näher eingegangen werden.

Die Begriffe *Open-Loop-Test* und *Closed-Loop-Test* werden in Analogie zur Regelungstechnik definiert. In Bild 5 sind Blockschaltbilder für beide Verfahren jeweils anhand des Tests eines einzelnen Steuergeräts dargestellt. Die Überlegungen gelten sinngemäß auch für den Softwaretest.

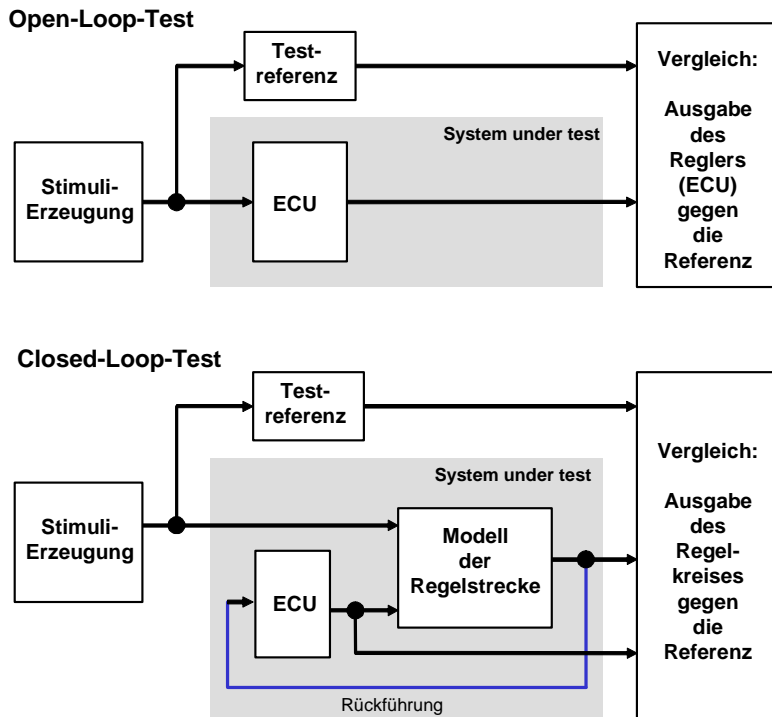


Bild 5: Blockschaltbild für Open-Loop- und Closed-Loop-Tests

Beim *Open-Loop-Verfahren* werden die Eingänge des Steuergeräts unmittelbar mit Testvektoren (Stimuli) beaufschlagt. Die Ausgangssignale werden erfasst und mit den von der Testreferenz erzeugten Sollwerten verglichen.

Durch Vergleich mit dem in Bild 1 dargestellten, allgemeinen Testmodell sieht man, dass das Steuergerät den Prüfling bildet.

Im Gegensatz dazu werden beim Closed-Loop-Verfahren die ECU-Eingangssignale nicht unmittelbar vom Stimuli-Generator des Testsystems erzeugt, sondern von einem Simulationsmodell der Regelstrecke. Diesem Modell werden sowohl die vom Testsystem generierten Stimuli als auch die Ausgangsgrößen der ECU zugeführt. Durch die Rückführung ergibt sich ein geschlossener Regelkreis. Das Testsystem erfasst sowohl die ECU-Ausgangssignale als auch die Modell-Ausgangsgrößen und vergleicht diese mit der Testreferenz.

Vergleicht man das Blockschaltbild wieder mit dem allgemeinen Test-Modell, so zeigt sich, dass bei dieser Testanordnung streng genommen der geschlossene Regelkreis aus ECU und Streckenmodell den Prüfling bildet. Dies bedeutet, dass die Aussagekraft des Testergebnisses nicht zuletzt von der Qualität des Simulationsmodells abhängt.

Die Entscheidung, ob ein Closed-Loop- oder Open-Loop- Testverfahren eingesetzt wird, hängt von den Eigenschaften der betrachteten ECU ab und sollte von Fall zu Fall sorgfältig abgewogen werden.

Open-Loop-Funktionstests sind vor allem für reaktive Systeme geeignet, also für ECUs, deren Verhalten sich im Wesentlichen durch Zustandsautomaten beschreiben lässt und die nicht Bestandteil von Regelkreisen mit kurzen Zeitkonstanten sind. Dies trifft auf viele Systeme im Bereich der Innenraum- und Karosserie-Elektronik zu. Hierbei lässt sich mit einfachen Mitteln eine relativ hohe Testabdeckung erzielen

Dagegen ist ein Closed-Loop-Test immer dann zu empfehlen, wenn schnelle Regelungen geprüft werden sollen, z.B. bei Motor- und Getriebesteuerungen sowie bei Schlupf- und Fahrodynamikregelungen (ABS, ESP). Aufgrund der erwähnten Abhängigkeit des Testergebnisses vom Streckenmodell sollte jedoch stets abgewogen werden, ob der Aufwand für ein Closed-loop-Testsystem mit dem notwendigen, hochwertigen Echtzeit-Simulationsmodell gerechtfertigt ist, oder ob alternativ ein frühzeitiger Test der Elektronik im Fahrversuch in Frage kommt.

3 Verbundtest

3.1 Motivation und Definition

Als Verbundtest bezeichnet man die Überprüfung verteilter Steuergerätfunktionen. Dies sind Funktionen, an denen mehr als ein Steuergerät beteiligt ist. Somit findet eine Wechselwirkung zwischen diesen Steuergeräten statt. Verteilte Funktionen sind in allen Elektronik-Segmenten von Kraftfahrzeugen zu finden. Als Beispiele seien erwähnt:

- Karosserie-Elektronik: Verteilte Beleuchtungssteuerung (Front- und Heckmodul),
- Antriebsstrang-Elektronik: Koordination von Verbrennungsmotor, Kupplung bzw. Wandler und Getriebe beim Schaltvorgang,
- Fahrwerk-Elektronik: Begrenzung des Verbrennungsmotor-Moments durch ABS bzw. ESP bei Aktivierung der Antriebs-Schlupfregelung (ASR-Funktion).

Spezifische Fragestellungen beim Verbundtest sind:

- Überprüfung, ob die an einem Bussystem angeschlossen ECUs die auf den verschiedenen Schichten des OSI-Schichtenmodells definierten Bus- oder Protokoll-Spezifikationen erfüllen („Conformance Tests“),
- Verhalten der ECUs bei Ausfall der Datenkommunikation („Fail-Safe-Tests“),
- Überprüfung der verteilten Funktionen, d.h. das Auslösen einer Aktivität auf einem entfernten Knoten mittels Kommunikation über das Bussystem („Funktionstest“).

3.2 Einordnung des Verbundtests in die Test-Systematik

Betrachtet man den unteren Teil von Bild 1, so besteht der „Prüfling“ beim Verbundtest aus einer Kombination mehrerer ECUs einschließlich des Datenbusses. Die Testreferenz muss das Soll-Verhalten aller im Verbund betrachteten ECUs abbilden.

In Tabelle 1 wurden die in der Automobilindustrie üblichen Test-Ebenen für Kfz-Elektronik dargestellt. Folgende der in Tabelle 1 definierten Testebenen sind dem Verbundtest zuzurechnen:

Teilverbundtest: Der Prüfling besteht aus allen ECUs, die durch ein einzelnes Bussystem gekoppelt sind, z.B. Antriebsstrang-CAN, Komfort-CAN, etc. Dazu gehören auch eventuell vorhandene ECUs mit Gateway-Funktion, die einen Austausch von Daten mit anderen Bussystemen im Fahrzeug ermöglichen. Diese weiteren Bussysteme und die daran angeschlossenen ECUs werden beim Teilverbundtest nicht betrachtet und in der Regel auf vereinfachte Weise simuliert. Diese Testebene ist beim OEM in der Regel in der Fachabteilung angesiedelt, die für das betreffende Bussegment verantwortlich ist. In den folgenden Abschnitten wird gezeigt, wie diese Art von Verbundtests mit überschaubarem Aufwand durchgeführt werden kann.

Gesamtverbund-Test im Labor: Die gesamte vernetzte Elektronik eines Fahrzeugs bildet den Prüfling. Meist wird der Gesamtverbundtest in einer Zentralabteilung beim OEM durchgeführt, da die notwendige Investition für die Testausrüstung sehr hoch ist und deshalb eine Wiederverwendbarkeit für verschiedene Fahrzeugbaureihen angestrebt wird. Einige Fahrzeughersteller verzichten aufgrund des hohen Aufwands auf diese Art des Labortests zugunsten einer Überprüfung des Gesamtverbunds im Fahrversuch.

Fahrzeugtest: Hier wird der gesamte Elektronik-Verbund im Fahrzeugprototyp auf Teststrecken oder auf öffentlichen Straßen überprüft. Dadurch entfällt gegenüber dem Laborversuch die Notwendigkeit einer Fahrzeugnachbildung. Die Überprüfung der Elektronik erfolgt unter vollständig realistischen Umgebungsbedingungen. Nachteilig sind die fehlende exakte Reproduzierbarkeit der Testbedingungen und die begrenzte Automatisierbarkeit dieses Testverfahrens. Vorhersagen der vergangenen Jahre, die einen weitgehenden Ersatz von Fahrversuchs-Tests von Kfz-Elektronik durch Labortests postulierten, haben sich bisher nicht bewahrheitet. Vielmehr konnte der Fahrversuch auch im Bereich der Elektronik seine Bedeutung als „Letzte Testinstanz“ behaupten, er wird jedoch durch Labortests von Detailaufgaben entlastet.

3.3 Paralleler Verbundtest

Die heute übliche Realisierung von Verbundtestanlagen stellt der parallele Verbundtester nach dem Hardware-in-the-Loop-Verfahren dar. Wie in Bild 6 dargestellt, werden alle zu prüfenden ECUs gleichzeitig (parallel) am Tester betrieben. Aufgrund der großen Anzahl von ECUs in heutigen Fahrzeugen mit zahlreichen angeschlossenen Sensoren und Aktuatoren ergibt sich dabei häufig die Notwendigkeit, die Ein- und Ausgabefunktionen sowie das Simulationsmodell auf mehrere gekoppelte Rechner zu verteilen. Der Vorteil dieser Anordnung ist, dass alle ECUs gleichzeitig am Tester betrieben werden können. Nachteilig ist jedoch der hohe Investitions- und Pflegeaufwand für eine solche Anordnung.

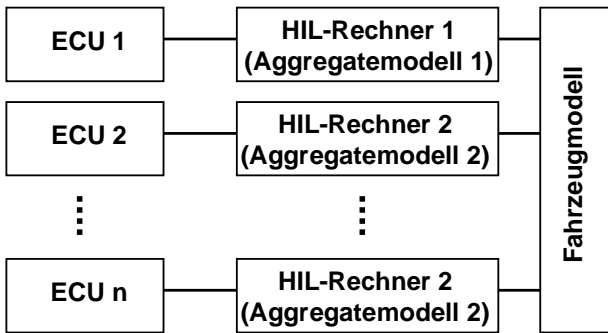


Bild 6: Paralleler Verbundtest

3.4 Teilparalleler Verbundtest

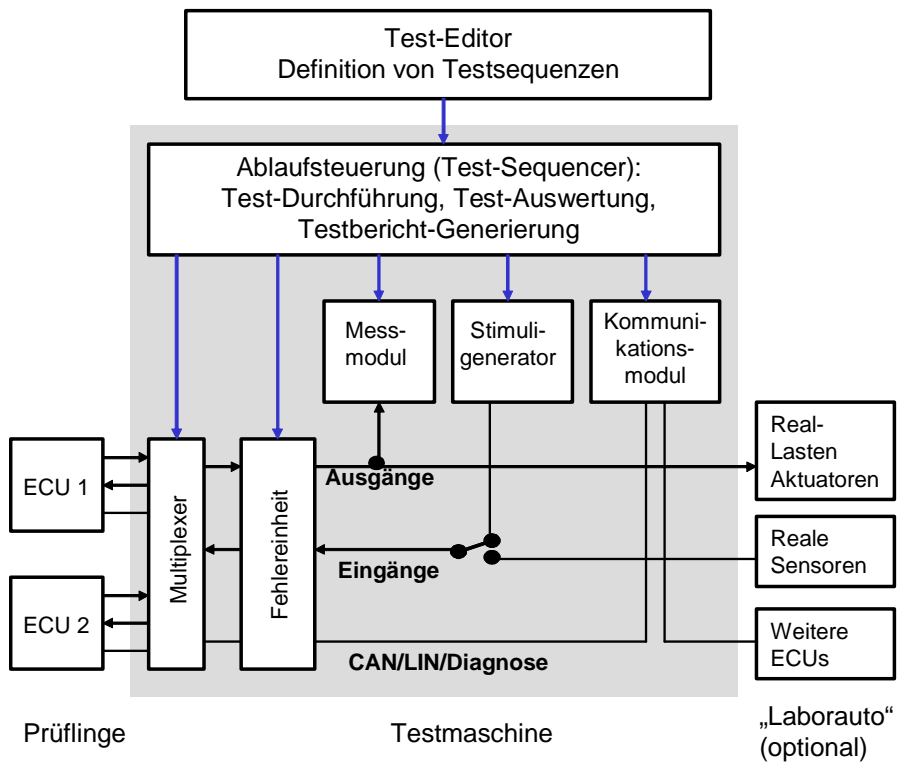


Bild 7: Teilparalleler Verbundtest

Am FKFS wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Möglichkeiten zur Vereinfachung von Verbundtests untersucht. Dabei stehen folgende Zielsetzungen im Vordergrund:

- Verfügbarkeit der Test-Ausrüstung zeitgleich mit der Verfügbarkeit der ECU-Prototypen („B-Muster“), so dass Testabläufe parallel zur Spezifikation der ECUs erstellt werden können,
- Vereinheitlichung der Testausrüstung und Testabläufe für die Testphasen Einzelsteuergerätestest, Verbundtest in Labor und Verbundtest im Fahrversuch,
- Reduktion der Kosten durch Wiederverwendbarkeit der Test-Ausrüstung.

Als Ergebnis der Untersuchungen ist das Konzept des teilparallelen Verbundtests mit der Bezeichnung P.A.T.E. (Personal Automatic Tester for Electronics) entstanden. Dieses Konzept wird in Zusammenarbeit mit einem OEM praktisch umgesetzt und erprobt. In Bild 7 ist ein Blockschaltbild eines teilparallelen Verbundtesters dargestellt.



Bild 8: Verbundtester für Karosserie- und Innenraumelektronik

Der Tester besteht im Wesentlichen aus einem Stimuli-Generator zur Erzeugung von elektrischen Signalen an den Steuergeräte-Eingängen und einem Messmodul zur Erfassung der ECU-

Ausgänge. Eine Fehlereinheit ermöglicht die Erzeugung von Kurzschlüssen, Unterbrechungen und weiterer elektrischer Fehler auf den ECU-Leitungen. Des Weiteren ist ein Kommunikationsmodul zur Erzeugung und Erfassung von CAN- und ggf. LIN-Daten sowie zur Abfrage interner ECU-Daten über die Diagnose-Schnittstelle vorhanden.

In Bild 8 ist eine Realisierung des beschriebenen Verbundtest-Verfahrens dargestellt. Der Tester wird bei einem OEM zur Prüfung des Verbunds aller Steuergeräte im Bereich der Innenraum- und Karosserie-Elektronik im Rahmen der Entwicklung eines neuen Oberklasse-Fahrzeugs eingesetzt.

Die Anlage ist als Universaltester ausgeführt. Das bedeutet, dass die verschiedenen Steuergeräte eines Verbundes, in diesem Fall des Karosserie- und Innenraum-Segments, am selben Tester überprüft werden können, nicht jedoch alle zugleich. Zu diesem Zweck besitzt der Tester eine Kombination von universellen Tester-Modulen für unterschiedliche Zwecke. Beispielsweise verfügt die dargestellte Anlage über folgende Module:

- Input-Modul mit 96 Kanälen zum Anschluss beliebiger Steuergeräte-Eingänge. Auf diesen Eingangskanälen können verschiedene Manipulationen vorgenommen werden, z.B. Fehlerinjektion und Simulation von Sensorsignalen.
- Mehrere Output-Module mit insgesamt 140 Kanälen zum Anschluss von Steuergeräte-Ausgängen und Stromversorgungs-Anschlüssen mit Maximalströmen von 10, 30 oder 60 A. An allen Ausgangs-Kanälen können Messungen von Spannung, Strom, Frequenz etc. vorgenommen werden.
- Bus-Modul mit der Möglichkeit zur Simulation und Manipulation der Datenströme auf mehreren CAN- und LIN-Bussen.

Die Zuordnung von Steuergeräte-Pins zu Tester-Kanälen ist nicht statisch, sondern wird erst bei der Testdurchführung durch Einträge in eine Datenbank festgelegt. So können auch Hardware-Änderungen (z.B. geändertes Pinning) während der Entwicklung schnell berücksichtigt werden.

Auf diese Weise ermöglicht die dargestellte Anlage Einzeltests aller Karosserie- und Innenraum-Steuergeräte. Mit der gleichen Anlage können jedoch auch Verbundtests durchgeführt werden. Dies wird durch den in Bild 7 links unten dargestellten Multiplexer ermöglicht, der die verfügbaren Tester-Kanäle dynamisch auf zwei angeschlossene Steuergeräte verteilen kann. Auf diese Weise können verteilte Funktionen getestet werden, an denen zwei ECUs beteiligt sind. Die zwei ECUs können in beliebigen Kombinationen an den Tester angeschlossen werden, sofern die Gesamtzahl der verfügbaren Kanäle nicht überschritten wird. Ein Gesamtverbundtest wird durchgeführt, indem nacheinander verschiedene Zweier-Kombinationen von ECUs getestet werden. Daher rührt die Bezeichnung „teilparalleler Verbundtest“.

Der Wechsel zwischen verschiedenen Steuergeräte-Kombinationen erfolgt sehr rasch, da alle Eigenschaften einer ECU jeweils in einer eigenen Datenbank abgelegt sind, die lediglich durch die Tester-Software eingelesen werden muss. Auch die Konfiguration des Testers selbst wird vollständig in einer Datenbank beschrieben. Dadurch enthält die Testeditierungs- und Testausführungs-Software keinerlei fest codierten Tester- oder ECU-spezifischen Daten.

Gesteuert wird die Testanlage von einem Test-Sequencer, also einer Ablaufsteuerung, die auf einem Rechner ausgeführt wird. Der Sequencer liest die formal definierten Testsequenzen ein, führt die notwendige Stimulation der ECU durch, erfasst die ECU-Reaktionen, wertet diese aus und erzeugt automatisch einen Testbericht.

3.5 Anwendung im Fahrversuch

Das beschriebene Tester-Konzept ist nicht nur für den Laboreinsatz geeignet, sondern kann auch im Fahrversuch angewendet werden. Diese Konfiguration ergibt sich, indem ein kompakte Version des Testers in einen Versuchsträger integriert wird. Der Tester wird in den Kabelbaum zu einer ECU eingeschleift. Betrachtet man nochmals Bild 7, so tritt an die Stelle des rechts unten dargestellten „Laborautos“ das reale Fahrzeug.

Auf diese Weise können z.B. „Fail-Safe-Tests“, d.h. die Überprüfung der spezifikationsgemäßen Reaktion einer ECU im Fehlerfall, unter realen Umgebungsbedingungen automatisiert im Fahrversuch durchgeführt werden, wobei die gleiche Testdefinitions- und Testausführungs-Software zum Einsatz kommt wie bei der Laborversion.

In Bild 9 ist beispielhaft die Einbausituation eines Testers in einem LKW dargestellt. In diesem Beispiel wird die Elektropneumatische Bremsanlage (EBS) überprüft.

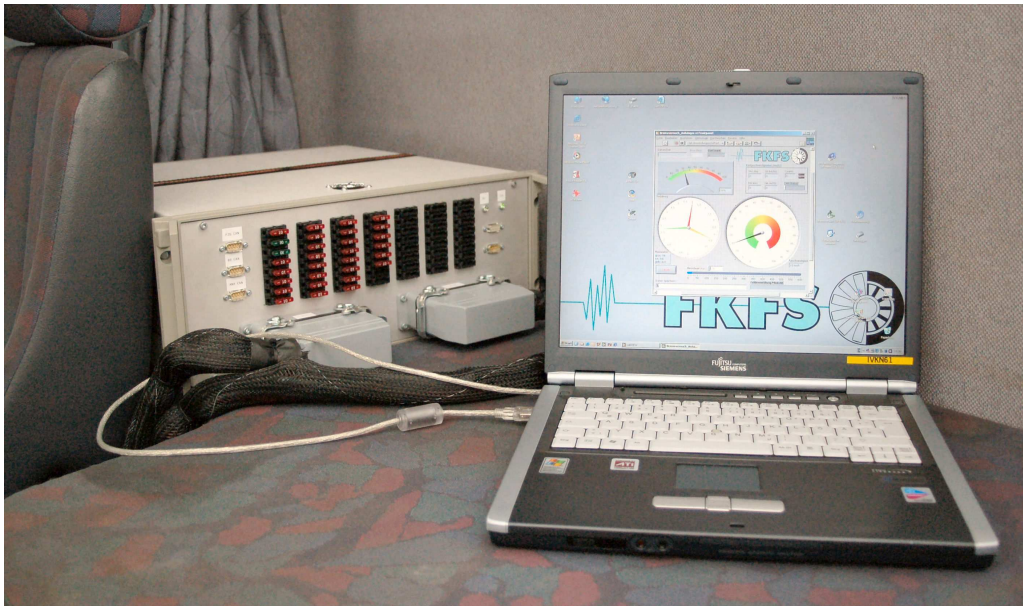


Bild 9: Einsatz eines PATE-Testsystems im LKW

4 Fazit

Aus der Informationstechnik ist bekannt, dass fast die Hälfte der Entwicklungskosten von Software auf Tests entfällt. Da die Embedded Software in der Kfz-Elektronik eine dominierende Rolle spielt, liegt der Testanteil bei den Entwicklungskosten für ECU's in einer ähnlichen Größenordnung. Das Testen von Kfz-Elektronik und -Software ist deshalb keine Nebenaktivität, sondern ein fester Bestandteil des Entwicklungsprozesses, der einen wesentlichen Beitrag zur Sicherung und Verbesserung der Qualität von mechatronischen Kfz-Systemen darstellt.

Um diese anspruchsvolle Aufgabe auch zukünftig bewältigen zu können, werden klar definierte Methoden, gut ausgebildete Ingenieure, leistungsfähige Software-Werkzeuge und standardisierte Test-Beschreibungsformate benötigt, die zwischen den auf dem Markt befindlichen Softwarewerkzeugen ausgetauscht werden können.

Auf diesen Gebieten liegen die Herausforderungen für die Zukunft.

Literatur

- [1] Harper, D.: *Online Etymology Dictionary*. <http://www.etymonline.com/>
- [2] Howden, W. E.: *Functional Program Testing & Analysis*. McGraw-Hill Verlag, 1987.
- [3] Liggesmeyer, P.: *Modultest und Modulverifikation: State of the art*. BI Wissenschaftsverlag, 1990.
- [4] Ebert, C.; Dumke, R.: *Software-Metriken in der Praxis*. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- [5] Dustin, E.; Rashka, J; Paul, J.: *Software automatisch testen*. Verfahren, Handhabung und Leistung. Berlin: Springer, 2000.
- [6] Conrad, M.: *Modell-basierter Test eingebetteter Software im Automobil*. Dissertation, TU Berlin, 2004.
- [7] Baumann, G.: *Werkzeuggestützte Echtzeit-Fahrsimulation mit Einbindung vernetzter Elektronik*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2003.
- [8] Hartmann, N.: *Automation des Tests eingebetteter Systeme am Beispiel der Kraftfahrzeugelektronik*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2001.