

Darwin im Prüflabor

Evolutionäres Testen von Steuergeräten zur Absicherung komplexer Systeme

Beim Testen elektronischer Steuergeräte werden betriebliche Situationen unter unterschiedlichen Bedingungen, die durch Systemzustände und Eingangsgrößen definiert sind, geprüft. Da jedoch Tests nur Stichproben sein können, bleibt die Gefahr, dass ein Fehlverhalten bis zum Einsatz des Steuergerätes nicht erkannt wird. Etablierte analytische Methoden helfen dabei, relevante Eingangsparameter zu finden. Aufgrund der Komplexität heutiger Steuergeräte ist die vollständige Erfassung des Systemverhaltens jedoch nicht realistisch. Das Ziel evolutionären Testens ist es deshalb, in einem stetigen Optimierungsprozess die Eingangsparameter der Testfälle automatisiert zu verändern, bis das Steuergerät ein Fehlverhalten aufweist.

Von Jörg Reiner und Jürgen Meyer

Evolutionäre Algorithmen orientieren sich an der biologischen Evolution. Die Prinzipien der Evolution werden dabei auf technische Optimierungsprobleme angewendet. In einem iterativen Prozess werden die Eingangsparameter modifiziert und die damit einhergehenden Auswirkungen ausgewertet. Jeweils am Ende einer Iteration erfolgt die Auswertung mit Hilfe einer so genannten Fitness-Funktion,

die bewertet, wie gut die Eingangsdaten für die Lösung eines Problems geeignet sind. Ein aus der theoretischen Informatik bekanntes Beispiel, bei dem evolutionäre Algorithmen erfolgreich eingesetzt werden können, ist das Handlungsreisendenproblem. Die Aufgabe ist dabei, den kürzesten Weg eines Handlungsreisenden zu ermitteln, der eine Menge von Städten besuchen soll. Bei der evolutionären Methode

wird hier zunächst eine Menge (z.B. 30) von zufälligen Städteverbindungen (Initialpopulation) erzeugt und jeweils deren zurückgelegte Strecke (Fitness) ermittelt. Dann werden die besten (z.B. 5) Städteverbindungen ausgewählt (Selektion) und diese anschließend verändert, indem einzelne Wege modifiziert werden (Mutation). Auch können ganze Streckenabschnitte untereinander ausgetauscht werden (Rekombination). Die dabei entstehenden neuen Städteverbindungen, deren Anzahl wieder der Anzahl der Initialpopulation entspricht, werden erneut bewertet und verändert.

Im biologischen Sinne entsteht bei jeder dieser Iterationen eine neue Generation von optimierten Städteverbindungen. Dieses Vorgehen wird wiederholt, bis eines der Abbruchkriterien erfüllt ist. Abbruchkriterien sind hier beispielsweise, dass die Länge des Weges einen bestimmten Wert unterschreitet, dass der Weg in den letzten zehn Generationen sich nicht weiter verkürzt hat oder dass eine bestimmte maximale Anzahl an Generationen erzeugt wurde.

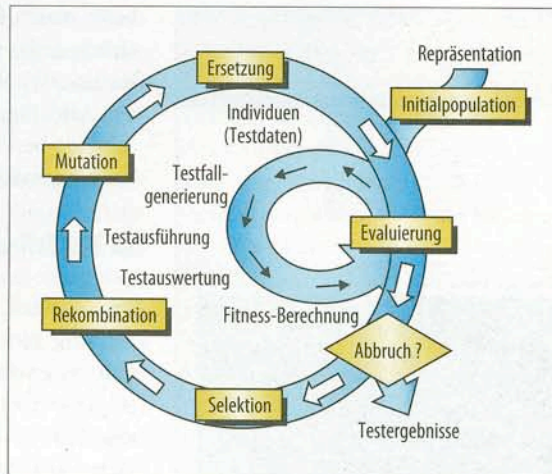
Evolutionäre Algorithmen sind bei der Optimierung von Eingangsparametern komplexer Systemen bereits

etablierte Methoden. Bei Testverfahren hingegen werden diese Methoden erst seit jüngerer Zeit eingesetzt. Aufgrund der zunehmend hohen Komplexität von elektronischen Steuergeräten, bietet sich die Anwendung evolutionärer Algorithmen beim Testen der Steuergeräte an. Ergänzend zu dem Kreislauf der evolutionären Algorithmen

werden beim evolutionären Testen aus den Individuen Testfälle generiert, die ausgeführt werden (**Bild 1**).

■ HiL-Systeme

Für Systemtests elektronischer Steuergeräte werden in der Automobilindustrie „Hardware in the Loop“-Prüfstände (HiL) verwendet. Mit diesen Prüfständen werden die Steuergeräte betrieben, indem die entsprechende Gegenstelle zum Steuergerät simuliert wird. Neben den Testläufen in den HiL-Prüfständen werden zunehmend bereits in frühen Phasen der Entwicklung Tests der Software durchgeführt. In diesen „Software in the Loop“-Tests (SiL) wird die Software, die später in dem Steuergerät zum Einsatz kommt, getestet, ohne dass diese bereits auf dem Steuergerät läuft. Dadurch werden einerseits die Fehler früh im Entwicklungsprozess gefunden und andererseits kann eine fehlerhafte Hardware



! Bild 1. Der Zyklus bei evolutionären Algorithmen.

als Ursache ausgeschlossen werden. Sofern eine geeignete Testumgebung eingesetzt wird, können die Testfälle der SiL-Umgebung in der HiL-Umgebung erneut ausgeführt werden, was einen wesentlichen Zeit- und Kostenvorteil bietet.

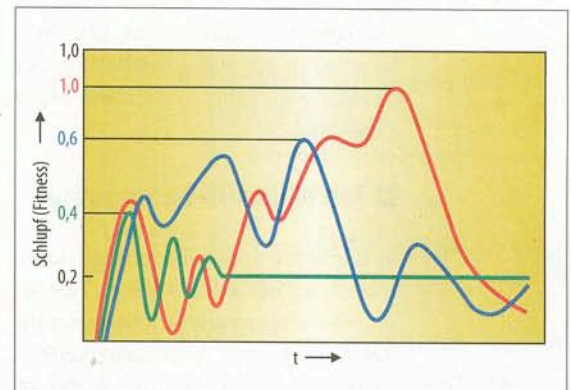
■ Testfallfindung

Die Testfallfindung variiert im Detail entsprechend dem angewendeten Entwicklungsprozess, die durchzuführenden Schritte sind jedoch in den meisten Fällen identisch: Die Testfälle werden aus der Anforderungsspezifikation abgeleitet, die das geforderte Systemverhalten beschreibt. Dabei werden üblicherweise für jede Anforderung ein oder mehrere Testfälle in einer Testspezifikation beschrieben, die das zu testende Systemverhalten überprüfen. Mehr als ein Testfall pro Anforderung ist insbesondere dann erforderlich, wenn das Verhalten von

den Eingangsdaten und dem Betriebszustand abhängig ist. Dabei werden etablierte Methoden, wie z.B. die Grenzwertanalyse oder die Klassifikationsbaummethode eingesetzt, um relevante Eingangsdaten zu bestimmen. Die Qualität der ausgewählten Daten entscheidet darüber, ob ein potentieller Fehler im Test aufgedeckt wird oder unerkannt bleibt. Während in einfachen Fällen die Daten durch Fachkenntnis und analytische Vorgehensweisen zuverlässig ermittelt werden können, sind diese bei komplexem Systemverhalten und einer Vielzahl von Eingangsparametern oft nicht mehr zuverlässig bestimmbar.

■ Fahrerassistenzsysteme

Fahrerassistenzsysteme sind mittlerweile in fast allen Fahrzeugen im Einsatz. Die Bandbreite reicht dabei vom ABS über ESP bis hin zu radarbasierten Abstandsregeltempomaten und kamerabasierten Systemen mit Lenk-



! Bild 2. Schlupfverläufe während eines Bremsvorganges (grün: ideales Einschwingen; blau: mögliches reales Einschwingen; rot: Blockieren der Räder).

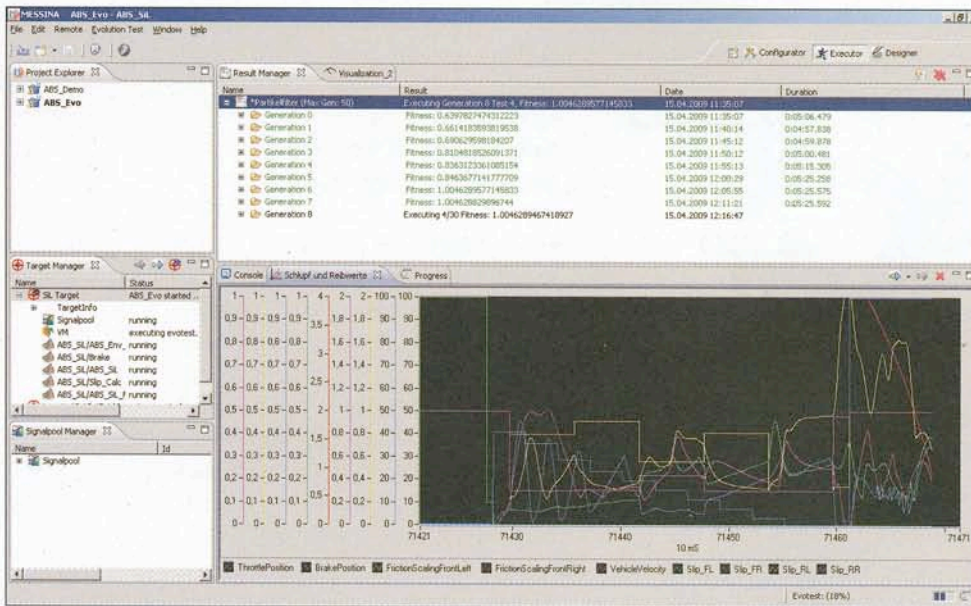


Bild 3. Die Testumgebung Messina.

eingriff. Die zunehmende Vernetzung im Fahrzeug und die damit verbundene gegenseitige Beeinflussung steigert die Komplexität zusätzlich. Künftig werden diese Systeme weiter in das Fahrerverhalten eingreifen, was die Sicherheitsrelevanz erhöht. Die Notwendigkeit für die Absicherung der Qualität wird dabei in gleichem Maße zunehmen.

Test eines ABS-Steuergerätes

In der hier beschriebenen Fallstudie geht es um den evolutionären Test eines ABS-Steuergerätes. Die wesentliche Aufgabe von ABS-Steuergeräten ist es, das Blockieren der Räder zu verhindern, indem es den Bremsdruck an den einzelnen Bremsen bei einem Bremsvorgang gezielt mindert. Eingangsseitig wertet das ABS-Steuergerät die Raddrehzahlen aus. Die Ausgänge des ABS-Steuergerätes sind die Ansteuerungen der Ventile an der Brems-hydraulik, mit denen der Bremsdruck vermindert werden kann. An jedem Rad werden dabei jeweils zwei Ventile angesteuert. Eines dieser Ventile verhindert den weiteren Druckaufbau, das andere sorgt für den Druckabfall des bereits bestehenden Druckes, sofern die erste Maßnahme nicht ausreichend Wirkung zeigt.

Das Maß des Blockierens je Rad ist der Schlupf. Wenn das Fahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit fährt, ist der Schlupf 0, d.h., dass der

Weg, den das Fahrzeug zurücklegt, der Abrolllänge der Räder entspricht. Andererseits ist der Schlupf 1, wenn die Räder blockieren. Beim Bremsvorgang ändert sich der Schlupf ständig und nimmt dabei Werte zwischen 0 und 1 an (Bild 2).

Testumgebung

Als Testplattform wird Messina verwendet (Bild 3). Neben der Fähigkeit SiL- und HiL-Tests durchzuführen, bietet Messina auch die Möglichkeit der automatisierten Ausführung evolutionärer Tests.

Das ABS-Steuergerät wird in eine Testumgebung eingebettet, die neben dem ABS-Steuergerät auch eine Simulation eines Fahrzeuges enthält. Zur Simulation der Fahrzeugdynamik wird veDyna der Firma Tesis verwendet. Dadurch können die Testfälle mit den Systemgrenzen arbeiten, die auch

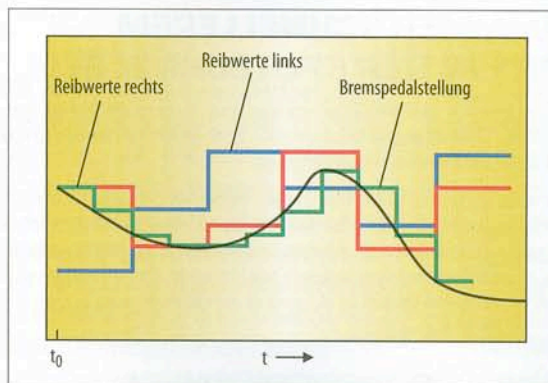


Bild 4. Beispiel für Eingangsparameter eines Testfalls.

beim realen Fahrzeug zur Verfügung stehen (z.B. Bremspedalstellung und Reibwerte). Die Raddrehzahlen, die das ABS-Steuergerät als Eingangsparmeter benötigt, werden durch das Fahrzeugmodell berechnet.

Testfall und Testdaten

Ein Testfall besteht in der Durchführung eines Bremsvorgangs. Das Fahrzeug wird auf eine definierte Geschwindigkeit beschleunigt und dann abgebremst. Während des Bremsvorgangs werden die Bremspedalstellung und die Reibwerte der Räder (jeweils für rechts und links) verändert, der Schlupf der vier Räder gemessen und der maximal erreichte Schlupf (oberhalb einer Geschwindigkeitsschwelle von 4 m/s) als Fitness-Wert für diesen Testdurchlauf gespeichert.

Die Eingangsparameter des Testfalls sind die zeitlichen Verläufe der Bremspedalstellung sowie der Reibwerte rechts und links. Um realitätsnahe Eingangsparameter zu erhalten, werden für die Berechnung unterschiedliche Verfahren verwendet: Als Reibwerte werden Werte zwischen 0,3 (Glatteis) und 1 (normaler, trockener Fahrbahnbelag) angenommen. Diese werden während des Bremsvorgangs alle 600 Millisekunden verändert. Für den neuen Wert ist es jeweils unerheblich, welcher Wert zuvor gesetzt war, da auch in der Realität sprunghafte Reibwertänderungen, z.B. bei gefrorenen Pfützen auftreten können. Im Gegensatz dazu ist die Bremspedalstellung in der Realität kontinuierlich, da der Fahrer nicht in der Lage ist, mehrfach pro Sekunde das Bremspedal voll durchzutreten und wieder loszulassen. Um das im Testfall realitätsnah abzubilden, wird eine Hüllkurve generiert und die Werte von dort alle 300 Millisekunden abgetastet.

Da der Bremsvorgang etwa fünf Sekunden dauert, werden als Eingangsdaten jeweils sechs Werte für die Reibwerte sowie elf Werte für die Bremskraft benötigt –

entsprechend besteht ein Testlauf aus 23 Eingangsparametern, aus denen der maximal erreichte Schlupf während des Bremsvorganges berechnet wird (Bild 4).

In dem hier durchgeführten Experiment werden diese Daten vor der Ausführung des Testfalls durch den Tester analytisch bestimmt und zusätzlich mittels evolutionärer Algorithmen berechnet. Bei den analytischen Verfahren wurden sowohl problemunabhängige Methoden (z.B. die Grenzwertanalyse) als auch problemspezifische Methoden (z.B. dass jeweils auf der Gegenseite des Fahrzeugs die Reibwerte die entgegengesetzten Extremwerte annehmen) angewendet. Die Analyse beschränkte sich auf das externe Verhalten des Steuergerätes: Kenntnisse über die innere Struktur, z.B. ein mögliches Schwingverhalten bei der Regelung, waren nicht vorhanden und konnten somit bei der analytischen Methode nicht berücksichtigt werden.

▣ Testergebnis

Während das ABS-Steuergerät durch die Vorgaben aufgrund einer analytischen Methode nicht zum Blockieren gebracht werden konnte, haben evolutionäre Tests zuverlässig nach spätestens 30 Generationen (Ausführungszeit je Generation ca. fünf Minuten) ein Blockieren der Räder hervorgerufen.

Eine genauere Betrachtung der Testergebnisse verdeutlicht, warum die analytische Methode keine befriedigenden Testergebnisse liefert: Die Eingangsdaten, die zum Blockieren der Räder führen, liegen nicht im Grenzbereich. Ferner beeinflussen kleine Veränderungen einzelner Parameter eines Testfalls das Testergebnis sehr stark. Ohne Kenntnisse der inneren Strukturen des Steuergerätes (z.B. der Regelkreise und deren Schwingungsverhalten) scheint eine erfolgreiche analytische Suche nach den gewünschten Testfällen ausgeschlossen zu sein.

Je größer die Menge der Eingangsparameter ist und je komplexer die Zusammenhänge sind, desto schwieriger ist es, mit analytischen Verfahren die relevanten Testfälle zu finden. Evolutionäre Tests bieten aufgrund ihres hohen Automatisierungsgrades

eine kostengünstige Möglichkeit, die Testabdeckung stark zu erhöhen. Da die evolutionäre Vorgehensweise keine Kenntnisse über den inneren Aufbau des zu testenden Systems erfordert, ist eine Anpassung an eine Vielzahl von Anwendungsfällen möglich. Insbesondere für den zunehmend komplexen Bereich der Fahrerassistenzsysteme lassen sich mit Hilfe evolutionärer Tests wertvolle Erkenntnisse über das Verhalten der Systeme in schwierigen Betriebsituationen bereits in Testlabors finden. *sj*



Dipl.-Ing. Jörg Reiner

studierte Elektrotechnik an der Universität der Bundeswehr in Hamburg. Seit 2001 arbeitet er als Software-Entwickler bei der Firma Berner & Mattner. Dort war er zunächst in verschiedenen Projekten als Software-Entwickler und Projektleiter im Bereich des Schienenverkehrs tätig. Seit 2006 arbeitet er im Bereich Automotive an der Entwicklung des Testsystems Messina.



Dipl.-Ing. Jürgen Meyer

studierte Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Karlsruhe und der TU München. Seit 2003 leitet er den Geschäftsbereich Automotive bei Berner & Mattner und ist verantwortlich für die Produktentwicklung und alle Dienstleistungen im Umfeld Software- und System-Entwicklung.