

# Ein neues automatisiertes Auswerteverfahren für Regressions- und Back-to-Back-Tests eingebetteter Regelsysteme

Hans-Werner Wiesbrock, Mirko Conrad, Ines Fey, Hartmut Pohlheim

Daimler Chrysler AG

{ Hans-Werner.Wiesbrock | Mirko.Conrad | Ines.Fey | Hartmut.Pohlheim } @ DaimlerChrysler.com

## Abstract

Beim Test software-basierter, eingebetteter Regelsysteme im Automobilbereich sind häufig sowohl Stimuli als auch Systemreaktionen zeitveränderliche Signale. Für den Regressionstest bzw. den Back-to-Back-Test verschiedener Ausprägungen dieser Systeme ist demzufolge ein Vergleich zeitveränderlicher (Output-)Signalverläufe notwendig.

Vorhandene Ansätze für eine Automatisierung derartiger Signalvergleiche basieren auf einfachen Differenzbildungen oder auf Standardverfahren aus der Signalverarbeitung und liefern bei komplexeren Anwendungen keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

Das vorgestellte Verfahren überwindet Limitierungen der bisher eingesetzten Standardverfahren und erlaubt aufgrund seiner Mehrstufigkeit eine an den praktischen Erfordernissen des Anwendungsgebietes orientierte automatisierte Bewertung der Ähnlichkeit zweier Signale.

So können weite Teile der Auswertung von Regressions- und Back-to-Back-Tests eingebetteter Regelsysteme automatisiert und entsprechend kostengünstig durchgeführt werden. Darüber hinaus erlaubt das Verfahren die Erkennung verschiedener systematischer Fehler, wie z.B. relativer Skalierungen und lokaler Verschiebungen der Signale.

Die vorgestellten automatisierten Auswerteverfahren werden derzeit bei der DaimlerChrysler AG pilotiert.

**Schlüsselwörter:** Modell-basierte Entwicklung, Modell-basierter Test, Testauswertung, Signalvergleich, Differenzmatrix-Verfahren

## 1 Einleitung

### 1.1 Modell-basierte Entwicklung eingebetteter Regelsysteme

Die Entwicklung software-basierter, eingebetteter Regelsysteme im Automobilbereich erfolgt seit Ende der 90er Jahre zunehmend Modell-basiert (vgl. [Bec00, HaRe01]). Dabei wird eine ausführbare Funktionsspezifikation (Funktionsmodell) erstellt, die zunächst zusammen mit einem Streckenmodell (Umgebungsmodell) simuliert und später direkt auf dem eingebetteten System (Steuergerät) implementiert werden kann. Die Modellierung erfolgt unter Verwendung von regelungstechnischen Blockschaltbildern und erweiterten Zustandsübergangsdiagrammen mit Werkzeugen wie Matlab / Simulink / Stateflow [TMW01]. Auf diese Weise liegt beim Modell-

basierten Ansatz bereits frühzeitig eine ausführbare Beschreibung der zu realisierenden Softwarefunktion in Form eines Modells vor. Im weiteren Entwicklungsverlauf werden aus einem solchen Modell Präzisierungen abgeleitet, die ebenfalls zu Modellen oder aber anderen Repräsentationsformen (C-Code, eingebettetes System) führen.

Im Hinblick auf die Software-Prüfung eröffnet der Modell-basierte Ansatz die Möglichkeit, schon die ausführbare Spezifikation dynamisch zu testen. Die hierfür verwendeten Testszenarien können dann für den Test neuer Modellversionen und der anderen Repräsentationsformen wieder verwendet werden, so daß in verschiedenen Entwicklungsstadien Prüfungen als Regressions- bzw. Back-to-Back-Tests durchgeführt werden können.

### 1.2 Regressions- und Back-to-back-Tests bei der Entwicklung eingebetteter Regelsysteme

Da eingebettete Regelsysteme zumeist kontinuierlich über Sensoren und Aktuatoren mit ihrer Außenwelt interagieren, müssen sie zeitveränderliche Sensorsignale verarbeiten können und zeitveränderliche Ausgaben erzeugen. Soll ein solches System beim Test durch Nachbildung typischer, im Betrieb auftretender Eingangsdaten stimuliert und zu einer Systemreaktion veranlasst werden, müssen die Testinputs in Form zeitveränderlicher Signalverläufe vorliegen. Die Stimulation mit solchen Signalverläufen ruft ebenfalls zeitbehaftete Systemreaktionen hervor.

Im Gegensatz zu 'klassischen' Software-Tests ist es hier entsprechend nicht ausreichend, einzelne statische Werte für die Auswertung der Tests zu vergleichen. Vielmehr müssen die erzeugten Systemreaktionen als zeitbehaftete Signale betrachtet werden.

Bei der Prüfung Modell-basiert entwickelter Systeme nehmen Regressions- und Back-to-Back-Tests breiten Raum ein: Um die Äquivalenz zwischen den verschiedenen Repräsentationsformen (z.B. die korrekte Überführung eines Modells in C-Code) nachzuweisen, werden Back-to-Back-Tests zwischen verschiedenen Repräsentationsformen durchgeführt. Darüber hinaus werden durch Fortschreibungen und Korrekturen entstehende Versionsstände innerhalb der einzelnen Repräsentationsformen (z.B. der Ersatz eines Teilmodells durch einen effizienteren, aber funktional gleichwertigen Algorithmus) durch Regressionstests miteinander verglichen.

Das Problem der Testauswertung für solche Regressions- und Back-to-Back-Tests kann auf Signalvergleiche zwischen Messsignalen  $o'(t)$ , d.h. der Systemreaktion des aktuellen Tests, mit Referenzsignalen  $o(t)$ , d.h. der Systemreaktion einer anderen Repräsentationsform oder einer älteren Version, zurückgeführt werden.

Eine manuelle Testauswertung erfolgt dementsprechend durch einen visuellen Vergleich der Signalplots von Mess- und Referenzsignal. Kontextbedingt wird nicht notwendigerweise auf absolute Gleichheit, sondern auf eine gewisse Ähnlichkeit im Verlauf der Signale geprüft: Signale werden dann als ähnlich eingestuft, wenn die Signalplots hinreichend dicht beieinander liegen. Eine solche visuelle Prüfung ist nicht nur hochgradig subjektiv, sondern je nach Anzahl der Signale / Tests und der Art der Abweichungen auch mit erheblichem zeitlichen Aufwand verbunden. Sie erfordert zudem erfahrene Tester.

Das Vorhandensein eines Testorakels in Form des Referenzsignals eröffnet jedoch die Möglichkeit der Automatisierung der Testauswertung.

Ziel einer solchen automatisierten Testauswertung ist es, automatisch und reproduzierbar festzustellen, ob ein Referenzsignal  $o(t)$  und ein Messsignal  $o'(t)$  zueinander ähnlich sind oder nicht. Besteht keine automatisch erkennbare Ähnlichkeit, sollen weiterhin (soweit möglich) aufgetretene Fehlerart(en) detektiert und Fehlerstelle(n) lokalisiert werden. Aussagekräftige Kenngrößen bzw. kompakte visuelle Darstellungen sollen in diesem Falle den menschlichen Tester bei der Fehlersuche unterstützen.

Die betrachtete Domäne gibt einige Randbedingungen vor, die eine Einschränkung des allgemeinen Problems des Signalvergleichs ermöglichen. Die folgenden Eigenschaften können für den Vergleich von Signalpaaren bestehend aus einem Referenzsignal  $o(t)$  und einem Mess- oder Testsignal  $o'(t)$  vorausgesetzt werden:

- $o(t)$  und  $o'(t)$  sind zeitdiskret.
- $o(t)$  und  $o'(t)$  haben die gleiche Länge.
- Die Datentypen (Wertebereiche) von  $o(t)$  und  $o'(t)$  sind gleich. Sowohl quasikontinuierliche, als auch n-äre oder binäre Signale können auftreten.
- I.d.R. handelt es sich um nichtperiodische Verläufe.
- Die Reihenfolge bestimmter Merkmale (Anstiege, Nulldurchgänge, ...) in den Signalverläufen ist signifikant.
- Sowohl zeitliche als auch Amplitudenabweichungen sind von Interesse; die Relevanz verschiedener Fehlertypen ist jedoch unterschiedlich.

Gängige Signalvergleichsverfahren berücksichtigen diese besonderen Bedingungen im Allgemeinen nicht und führen damit nicht zu zufriedenstellenden Auswertungsergebnissen. Abschnitt 2 gibt einen Überblick zu diesen Verfahren und zeigt problematische Anwendungsfälle. Abgeleitet aus diesen Erkenntnissen wird in Abschnitt 3 ein neues, mehrstufiges Auswerteverfahren vorgestellt, das die aufgezeigten Schwachstellen überwindet. Ab-

schnitt 4 fasst erste Erfahrungen zusammen. Abschließend folgen Zusammenfassung und Ausblick.

## 2 Gängige Signalvergleichsverfahren

Neben den manuellen optischen Vergleichsverfahren ('scharfes Hinsehen') werden in der industriellen Praxis auch automatisierte Vergleichsverfahren für den Signalvergleich im Rahmen der Testauswertung eingesetzt (vgl. [DSS+01, RWS01, HT01, SWG02]), die meist auf einfachen Differenzbildungen oder Standardverfahren aus der Signalverarbeitung basieren.

Bei den Differenzbildungsverfahren wird für jeden Zeitpunkt  $t_i$  die Amplitudendifferenz zwischen Mess- und Referenzsignal bestimmt und ggf. geeignet normiert. Gängig sind dabei absolute, relative und steigungsabhängige Differenzbildung.

Ist das Maximum des jeweiligen Differenzvektors kleiner als eine zulässige Toleranz, werden die Signale als ähnlich, andernfalls als unähnlich eingestuft.

Differenzbildungen gehören zu den am einfachsten umzusetzenden Vergleichsverfahren. Sie erlauben eine abgestufte Behandlung von Amplitudenfehlern und können durch unterschiedliche Normierungen an spezielle Randbedingungen (z.B. Signale mit starken Amplituden-/Steigungsunterschieden) adaptiert werden. Allein angewendet, sind sie allerdings nicht geeignet, lokale zeitliche Verschiebungen zu handhaben. 'Quantisierungsrauschen', das durch den Übergang von Gleitkomma- zu Festkommaarithmetik bedingt ist, führt bei diesen Verfahren zu einer Einstufung als unähnlich, obwohl entsprechende Signalpaare im Anwendungskontext als ähnlich gelten.

Eine spezielle Fenstertechnik, die als Toleranzschlauchverfahren (*tubeDiff*) bezeichnet wird, kann als Erweiterung der Differenzbildungsverfahren im Hinblick auf eine bessere Robustheit gegenüber leichten Zeitabweichungen aufgefasst werden: Hierbei werden um die einzelnen Punkte des Referenzsignals kleine Kreise ('Fenster') gelegt, die einen Toleranzschlauch bilden. Liegt das Testsignal innerhalb des Schlauches, werden beide Signale als ähnlich eingestuft.

Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass veränderte Merkmalsreihenfolgen übersehen werden können. In Abb. 1 liegen die lokalen Maxima von beiden Signalen zeitlich so dicht beieinander, dass deren zeitliche Verschiebung als zulässig erachtet wird, da sie innerhalb eines Toleranzschlauches vom Radius 2 Abtast Schritte liegt. Gleiches gilt für die lokalen Minima. Die veränderte Merkmalsreihenfolge (erst das Maximum, dann das Minimum beim Referenzsignal; erst das Minimum, dann das Maximum beim Messsignal) wird nicht erkannt. Im Falle signifikanter Merkmalsreihenfolgen, ist das Toleranzschlauchverfahren also nur bedingt anwendbar. Ferner ist eine genauere Analyse der zeitlichen Verschiebungen nicht möglich.

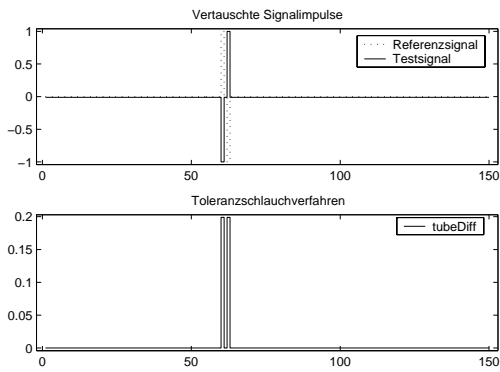


Abb. 1: Toleranzschlauchverfahren: Vertauschung von Merkmalsreihenfolgen ( $\Delta t = 0,1$ )

Ein gängiges, aus der Signalverarbeitung stammendes Verfahren zur Beurteilung der Ähnlichkeit von Signalen ist die diskrete Kreuzkorrelation [CWS+01]. Als Kenngröße für die Ähnlichkeit der beiden Signale dient der Kreuzkorrelationskoeffizient  $KKR(k)$ :

$$KKR(k) = \sum_{i=0}^{t_{\max}-1} o(t_i) \cdot o'(t_{i+k})$$

$t_{\max}$  : Signaldauer

Zu seiner Bildung werden die Signalamplituden miteinander multipliziert und dann aufsummiert, wobei zusätzlich eines der Signale um  $k$  Zeitschritte verschoben wird.

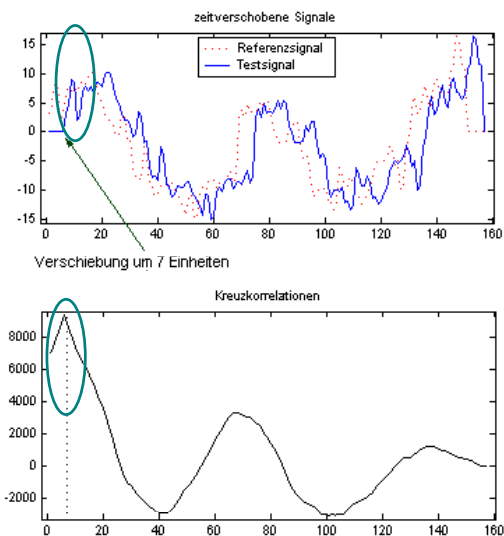


Abb. 2: Kreuzkorrelation: zeitlich verschobene Signalverläufe

In der Nachrichtentechnik wird die Kreuzkorrelation verwendet, um zeitliche Verschiebungen zwischen (verrauschten) Signalen zu detektieren. Sie ist geeignet, globale zeitliche Verschiebungen zwischen einfachen Vergleichssignalen zu identifizieren.

Bei komplexeren Signalen stößt sie jedoch an ihre Grenzen (vgl. [RWS+01]). Abb. 2 oben zeigt zwei um 7 Abtastschritte zueinander verschobene Signale. Die darunterliegende graphische Darstellung der Kreuzkor-

relation weist neben dem zu erwartenden globalen Maximum bei  $k=7$  verschiedene weitere lokale Maxima auf. Rückschlüsse auf die Art des Fehlers (Größe und Bereich der Verschiebung) und Aussagen zur Ähnlichkeit der beiden Signale lassen sich nicht automatisch ableiten. Hinzu kommt, dass dieses Verfahren nicht in der Lage ist, lokale Zeitverschiebungen aufzudecken.

Als weiteres statistisches Maß sei der Korrelationskoeffizient erwähnt. Hierbei werden beide Signale als Zufallsgrößen aufgefasst und ihre statistische Abhängigkeit berechnet:

$$\rho(o(t), o'(t)) = \frac{E((o(t) - E(o(t)))(o'(t) - E(o'(t))))}{\sqrt{D^2(o(t)) \cdot D^2(o'(t))}}$$

$\sqrt{D^2(\dots)}$  : Standardabweichung

$E(\dots)$  : Erwartungswert

Ein Korrelationskoeffizient nahe 1 wird dabei als hohe Signalähnlichkeit interpretiert.

Hohe, zeitlich eng begrenzte Amplitudenabweichungen können bei Verwendung des Korrelationskoeffizienten unerkant bleiben.

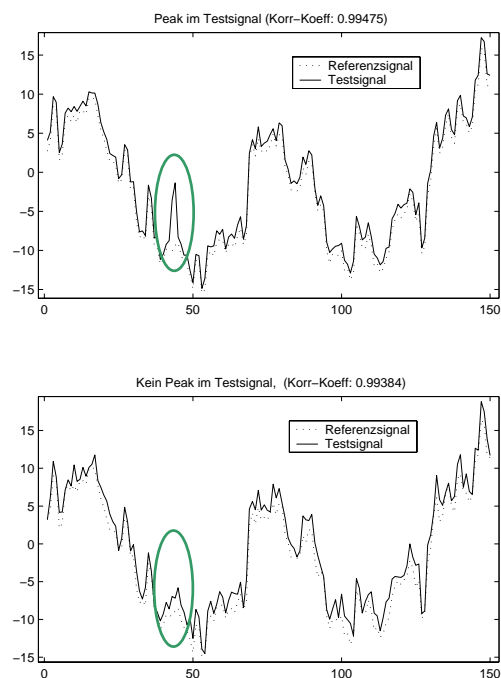


Abb. 3: Korrelationskoeffizient: zeitlich begrenzte Amplitudenfehler

Abb. 3 zeigt im oberen Teil zwei Signale, die sich an einer Stelle durch einen signifikanten Amplitudenunterschied (Peak), sonst aber nur durch zufällige Fehler kleiner Amplitude (Rauschen) unterscheiden. Die Signale im unteren Teil der Abbildung weisen keinen solchen Peak auf, lediglich das Rauschen wurde leicht verstärkt. Obwohl der Peak im Testsignal im Anwendungskontext eine höhere Kritikalität aufweist als die Abweichungen im unteren Signalpaar, sind die Korrelationskoeffizienten beider Signalaare nahezu identisch.

Weitergehende Verfahren sind im Zusammenhang der Sprach- und Bilderkennung entwickelt worden. Der Fokus dieser Techniken liegt in der Entdeckung von Mustern und Formen in Signalen, welche durch Verrauschen z.B. verfremdet sind.

Diese Verfahren sind für die vorliegende Problemstellung ebenfalls kaum einsetzbar, da beim Signalvergleich im Rahmen von Regressions- und Back-to-back-Tests von Softwarekomponenten eingebetteter Systeme (thermisches) Rauschen i.d.R. vernachlässigbar ist und die Wiedererkennung von Mustern und Strukturen nicht im Vordergrund steht.

### 3 Mehrstufiges Signalvergleichsverfahren

Die Evaluierung gängiger Vergleichsverfahren hat gezeigt, dass für die Aufgabenstellung der Testauswertung auf Basis von Signalvergleichen problemangepasste, über die gängigen Verfahren hinausgehende, Lösungen benötigt werden.

Ergebnis der Entwicklung ist ein generisches mehrstufiges Vergleichsverfahren, bei dem der eigentlichen Signalvergleichskomponente ein Vorverarbeitungsschritt vorangestellt wird. Beide Komponenten können mit verschiedenen Algorithmen instantiiert und parametrisiert werden. Darüber hinaus wurden Standardkomponenten und Defaultparametrisierungen für einen automatischen Signalvergleich identifiziert.

In den folgenden beiden Abschnitten werden Algorithmen, die in der Standardvariante der Vorverarbeitungs- bzw. Signalvergleichskomponente zum Einsatz kommen vorgestellt. Abschnitt 3.3 beschreibt die verwendete Defaultparametrisierung.

#### 3.1 Vorverarbeitungskomponente

Im Rahmen der Vorverarbeitung werden durch Differenzbildungsverfahren zunächst Zeitintervalle identifiziert, in denen die Amplitudenabweichungen eine definierte Toleranzschwelle überschreiten. Für die Differenzbildung finden dabei neben der absoluten Differenz (siehe Abschnitt 2) modifizierte Formen der relativen und der steigungsabhängigen Differenz Verwendung (siehe Abschnitt 3.2).

Beschränkt auf die identifizierten Intervalle mit signifikanten Amplitudenabweichungen werden die Signale dann auf mögliche zeitliche Verschiebungen hin untersucht. Zu diesem Zweck wurde das symmetrische Differenzmatrix-Verfahren entwickelt.

#### Differenzmatrix-Verfahren

Das Differenzmatrix-Verfahren erlaubt die Untersuchung von Signalpaaren auf zeitliche Verschiebungen in vorgegebenen Intervallen.

Aufgabe des Verfahrens ist es, eine geeignete Reparametrisierung (zeitliche Umordnung)  $\gamma : [1, t_{max}] \rightarrow [1, t_{max}]$  des Messsignals  $o'(t)$  zu finden, so dass dieses das Referenzsignal  $o(t)$  möglichst gut appro-

ximiert ('best match'), d.h. so dass  $o'(\gamma(t)) \approx o(t)$  gilt. Die zeitliche Reihenfolge der Abtastpunkte muß hierbei respektiert werden.

Um eine anschauliche Vorstellung einer solchen Reparametrisierung zu erhalten, stelle man sich die Zeitachse des Messsignals  $o'(t)$  als Feder vor, die man durch lokales Stauchen und Strecken verändern kann. Man verschiebt nun die einzelnen Abtastpunkte auf ihr entlang der Zeitachse, so dass sich die Signalverläufe von Referenz- und Messsignal möglichst gut decken (Abb. 4). Die resultierenden Federspannungen definieren dann eine geeignete Reparametrisierung.

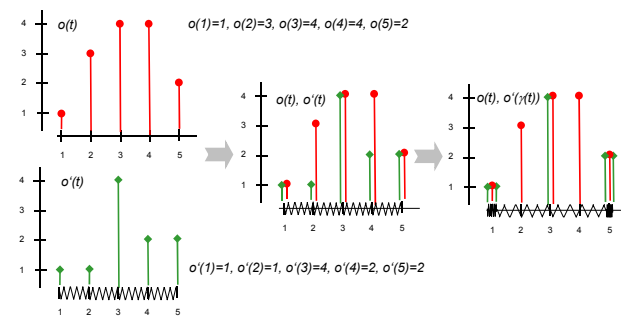


Abb. 4: Differenzmatrix-Verfahren: Veranschaulichung der Umparametrisierung

Ausgangspunkt für die Berechnung einer solchen Reparametrisierung ist die sogenannte Differenzmatrix  $DiffM(t_i, t_j) = |o(t_i) - o'(t_j)|$ , deren Einträge die Beträge der verschiedenen Signaldifferenzen sind (vgl. [RWS01])<sup>1</sup>. Um die Stabilität des nachfolgenden Algorithmus zu erhöhen, werden diese Differenzen in ganzzahligen Vielfachen einer zu tolerierenden Abweichung  $\epsilon$  ausgedrückt, Ergebnis ist eine modifizierte Differenzmatrix  $modDiffM$ :

$$modDiffM(t_i, t_j) = \lfloor DiffM(t_i, t_j) / \epsilon \rfloor$$

$$DiffM(t_i, t_j) \approx modDiffM(t_i, t_j) \cdot \epsilon$$

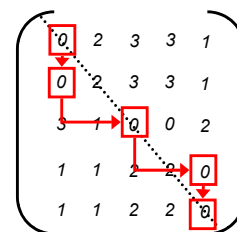


Abb. 5: Differenzmatrix-Verfahren: Weg durch die modifizierte Differenzmatrix ( $\epsilon=1$ )

Abb. 5 zeigt eine solche modifizierte Differenzmatrix für das Signalpaar aus Abb. 4.

Innerhalb der modifizierten Differenzmatrix werden nun Wege untersucht, die von der linken oberen Ecke schritt-

<sup>1</sup> In [RWS01] wird eine visuelle Analyse dieser Matrix zur Unterstützung des Signalvergleichs vorgeschlagen.

weise eine Zeile nach unten gehen und dabei beliebig viele Schritte nach rechts wandern dürfen (Abb. 5).

Die Länge eines solchen Weges ist definiert als Summe der durchlaufenen Matrixeinträge und einem Strafterm, der die globale Abweichung des Weges von der Hauptdiagonalen misst und waagerechte Weganteile mit einer Länge ungleich eins bestraft. Der bezüglich dieser Länge kürzeste Weg durch die Differenzmatrix definiert dann eine geeignete Reparametrisierung der Signale, im Beispiel also:

$$\gamma: \{t_1 \mapsto t_1, t_2 \mapsto t_1, t_3 \mapsto t_3, t_4 \mapsto t_5, t_5 \mapsto t_5\}$$

Die Analyse der so berechneten optimalen Reparametrisierung  $\gamma$  der beiden Signale erlaubt dann Rückschlüsse auf vorhandene zeitliche Verschiebungen zwischen beiden Signalen.

Im Rahmen der Standard-Vorverarbeitungs-komponente findet eine symmetrisierte Form des Differenzmatrix-Verfahrens Verwendung. Auf diese Weise können auch eng begrenzte Amplitudenabweichungen (Peaks) entdeckt werden.

### 3.2 Signalvergleichskomponente

Falls die entdeckten zeitlichen Abweichungen eine vorgegebene Schwelle nicht überschreiten, werden anschließend die reparametrisierten Signale erneut über eine Differenzbildung auf ihre Ähnlichkeit hin beurteilt. Die Bestimmung der Amplitudendifferenzen muss dabei mit dem gleichen Differenzbildungsverfahren erfolgen, das bereits im ersten Schritt der Vorverarbeitung zum Einsatz kam.

Prinzipiell können alle im Abschnitt 2 erwähnten Differenzbildungsverfahren zum Einsatz kommen, die gängigen relativen und steigungsabhängigen Differenzen sollten jedoch modifiziert werden.

#### Modifizierte Differenzbildungsverfahren

Mit der Intention, Abweichungen im Falle großer Amplituden oder Steigungen zu relativieren, gewichten die in Abschnitt 2 erwähnten relativen und steigungsabhängigen Differenzen jedoch auch Bereiche mit kleinen Amplituden oder Steigungen unverhältnismäßig stark. Im Bereich von Nullstellen bzw. flachen Stücken führt dies bereits bei kleinsten Amplitudenabweichungen bereits zu inakzeptabel großen Differenzen. Deshalb werden folgende modifizierte Varianten vorgeschlagen:

- **Modifizierte relative Differenz:**  

$$\text{modrelDiff}(t_i) = \min(\text{relDiff}(t_i), \text{absDiff}(t_i))$$

$$= \frac{|o(t_i) - o'(t_i)|}{\max(\sqrt{|o(t_i)| \cdot |o'(t_i)|}, 1)}$$
- **Modifizierte steigungsabhängige Differenz:**  

$$\text{modslopeDiff}(t_i) = \min(\text{slopeDiff}(t_i), \text{absDiff}(t_i))$$

$$= \frac{|o(t_i) - o'(t_i)|}{\max\left(\sqrt{\frac{1}{2\Delta t} |o(t_{i-1}) - o(t_{i+1})|} \cdot \sqrt{\frac{1}{2\Delta t} |o'(t_{i-1}) - o'(t_{i+1})|}, 1\right)}$$

Diese Modifikationen relativieren ebenfalls Abweichungen bei großen Amplituden bzw. Steigungen, übergewichten aber nicht mehr die Bereiche kleiner Signalwerte oder flacher Anstiege.

Im Rahmen der Standard-Signalvergleichskomponente kann zwischen der absoluten Differenzbildung und einer der beiden modifizierten Differenzen gewählt werden. Wiederum findet dabei eine Symmetrisierung statt. Das Abtastpunkt-bezogene Maximum beider Differenzbildungen wird dann mit der zulässigen Toleranzschwelle verglichen.

### 3.3 Defaultparametrisierung

Um das vorgeschlagene mehrstufige Vergleichsverfahren zu automatisieren und Userinteraktionen zu minimieren, werden aus dem Referenzsignal Default-Toleranzschwellen und weitere Verfahrensparameter abgeleitet.

Dazu werden charakteristische Größen des Referenzsignals, wie Standardabweichung und Mittelwert berechnet, aus denen dann folgende Default-Toleranzschwellen bestimmt werden:

$$\text{tol}_{absDiff} \sim \max(o(t)) - E(o(t)) + \sqrt{D^2(o(t))}$$

$$\text{tol}_{relDiff} \sim \text{tol}_{absDiff} / \max(E(o(t)), 1)$$

$$\text{tol}'_{relDiff} \sim \text{tol}'_{absDiff} / \max(E(o(t)'), 1)$$

$$\text{mit } o(t_i)' = \frac{o(t_{i-1}) - o(t_{i+1})}{2 \cdot |t_{i+1} - t_{i-1}|}$$

Der jeweilige Proportionalitätsfaktor bestimmt die Empfindlichkeit des Signalvergleichs. Je kleiner er gewählt wird, umso näher beieinander müssen die Signale liegen, um als ähnlich akzeptiert zu werden. In praktische Experimenten hat sich ein Proportionalitätsfaktor von 0.001 für die absolute Differenz als günstig erwiesen.

Die Toleranzschwelle  $\text{tol}_{absDiff}$  bildet gleichzeitig den für die Berechnung der modifizierten Differenzmatrix benötigten Parameter  $\varepsilon$  (vgl. Abschnitt 3.1).

## 4 Ergebnisse und Erfahrungen

Das vorgeschlagene mehrstufige Vorgehen ermöglicht nicht nur die Erkennung zeitlich begrenzter Abweichungen, sondern auch einen adäquaten Vergleich zeitlich zueinander verschobener Signale. Hierdurch zeichnet es sich bereits gegenüber den im Abschnitt 2 diskutierten herkömmlichen Differenzbildungsverfahren und statistischen Vergleichsverfahren aus. Im Gegensatz zum Toleranzschlauchverfahren werden vertauschte Merkmalsreihenfolgen (wie im Beispiel aus Abb. 1) als signifikante Unterschiede identifiziert.

Darüber hinaus eröffnet das Differenzmatrix-Verfahren weit über herkömmliche Vergleichsmethoden hinausgehende Analysemöglichkeiten: Systematische zeitliche Streckungen, Stauchungen und Verschiebungen, auch wenn sie nur in begrenzten Zeitbereichen auftreten, können identifiziert werden.

Die Performanz des Differenzmatrix-Verfahrens ist linear in der Signallänge und hängt von der gewünschten Suchtiefe beim Auffinden des kürzesten Weges durch die modifizierte Differenzmatrix ab. Sie ist mit der Performanz des Toleranzschlauchverfahrens vergleichbar. Das Verfahren kann bei üblichen Signallängen von  $\leq 2000$  Abtastpunkten online durchgeführt werden. Durch die vorangestellte Partitionierung in Intervalle signifikanter Abweichungen können auch Signale mit mehr als 20.000 Abtastpunkten und wenigen zeitbeschränkten Abweichungen in kurzer Zeit analysiert werden.

Die Tauglichkeit der Default-Toleranzschwellen wurde anhand zahlreicher Signalpaare bestätigt. Die konkreten Proportionalitätsfaktoren variieren jedoch mit dem Anwendungskontext: Stammen die Referenzdaten beispielsweise aus Messungen, so sind höhere Toleranzschwellen anzusetzen, als bei Systemreaktionen von Modellen. Die Konsolidierung der Default-Toleranzschwellen erfordert Erfahrungen aus weiteren realen Projekten.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Modell-basierte Entwicklung eingebetteter Regelsysteme ermöglicht und erfordert zugleich neue Verfahren bei der automatisierten Testauswertung. Im Rahmen von Regressions- und Back-to-Back-Tests sind dabei Verfahren zum Vergleich zeitveränderlicher Signalverläufe von besonderem Interesse.

Herkömmliche Vergleichsmethoden wie einfache Differenzbildungen, Kreuzkorrelation oder einfache Fenster-techniken (z.B. Toleranzschlauchverfahren) erweisen sich unter den konkreten Randbedingungen des Anwendungsgebietes als unzulänglich. Daher wurde ein neues, mehrstufiges Vergleichsverfahren entwickelt, das eine automatisierte Testauswertung erlaubt und viele der erkannten Defizite der vorfindlichen Verfahren überwindet.

## Literatur

- [Bec00] P. Bechberger: Modellbasierte Software-Entwicklung für Steuergeräte. Automobiltechnische Zeitschrift/ Motortechnische Zeitschrift (ATZ / MTZ), Sonderausgabe "Automotive Electronics", Jan. 2000.
- [CDF+99] M. Conrad, H. Dörr, I. Fey, A. Yap: Model Based Generation and Structured Representation of Test Scenarios. Proc. of the Workshop on Software-Embedded Systems Testing (WSEST '99), Maryland, USA, 1999.
- [DSS+01] M. Dornseiff, M. Stahl, M. Sieger, E. Sax: Durchgängige Testmethoden für komplexe Steuerungssysteme – Optimierung der Prüftiefe durch effiziente Testprozesse. 10. Internationaler Kongress Elektronik im Kraftfahrzeug, Baden-Baden, Deutschland, Sept. 2001.
- [HaRe01] Model-Based Tools Update. The Hansen Report on Automotive Electronic, Vol. 14, No. 5, [www.hansenreport.com](http://www.hansenreport.com), Juni 2001.
- [HT01] R. Helldörfer, U. Teubert: Automated Software Verification at TEMIC. dSPACE News, Frühjahr 2001.
- [TMW01] Using Simulink. The MathWorks, Inc., [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com), 2001.
- [RWS01] C. Ritter, J. Willibald, E. Sax: Auswertemöglichkeiten von Systemantworten im Steuergeräteumfeld - ein Überblick. Projektbericht FZI-ESM-DCB-TN-1-1.0, Karlsruhe, März 2001.
- [RWS+01] C. Ritter, J. Willibald, E. Sax, K. D. Müller-Glaser: Entwurfsbegleitender Test für die modellbasierte Entwicklung eingebetteter Systeme. 13<sup>th</sup> Workshop Testmethods on Reliability of Circuits and Systems, Miesbach, Deutschland, Feb. 2001.
- [SWG02] E. Sax, J. Willibald, K. D. Müller-Glaser: Seamless testing of embedded control systems. 3<sup>rd</sup> IEEE Latin-American Test Workshop, Montevideo, Uruguay, Feb. 2002.

Grundbestandteil ist das Differenzmatrix-Verfahren, das hier erstmalig vorgestellt wurde. In der Performanz vergleichbar mit dem Toleranzschlauchverfahren eröffnet es weit über herkömmliche Vergleichsmethoden hinausgehende Analysen lokaler wie globaler zeitlicher Abweichungen.

Die Integration des Differenzmatrix-Verfahrens mit anderen Techniken im Rahmen des hier vorgestellten mehrstufigen Ansatzes führt zu einer Kombination der Vorteile von Differenzbildungen gegenüber statistischen Verfahren mit den Vorteilen des Toleranzschlauchverfahrens, ohne dessen Nachteile zu erben.

Insbesondere erlaubt es eine getrennte Analyse von zeitlichen Abweichungen und Amplitudenabweichungen: Peaks oder vertauschte Merkmalsreihenfolgen können so eindeutig identifiziert, geringe zeitliche Abweichungen dagegen toleriert werden. Zukünftige Entwicklungen sollen eine detailliertere Analyse der gefundenen Abweichungen und die Berücksichtigung gekoppelter Signale ermöglichen.

Ein wichtiger Schritt zu einer automatisierten Auswertung von Regressions- und Back-to-Back-Tests ist die automatische Ermittlung von Default-Toleranzschwellen und anderen Verfahrensparametern. Die weitere Verbesserung der hier vorgestellten Defaultparametrisierungen ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

Die vorgestellten Verfahren wurden in Form einer Testauswertungs-Toolbox (TEval Tbx) prototypisch in Matlab implementiert und an Beispielen verschiedener realer Projekte erfolgreich erprobt. Die Testauswertungs-Toolbox kann sowohl im Stand-Alone-Modus betrieben werden als auch in die Modell-basierte Testumgebung MTest [CDF+99] integriert werden. Diese Integration ermöglicht eine nahtlose Verzahnung mit dem die Modell-basierte Entwicklung begleitenden Testprozess (Modell-basierter Test).