

Alexander Hutter

**Eine Systematik  
zur Erstellung virtueller Steuergeräte  
für Hardware-in-the-Loop-Integrationstests**

Herausgegeben von

**Prof. Dr.-Ing. Klaus Bender  
Technische Universität München**

in der Reihe

**Informationstechnik im Maschinenwesen**



Herbert Utz Verlag · München  
2006

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2006

ISBN-10 3-8316-0637-4

ISBN-13 978-3-8316-0637-5

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

089-277791-00

[www.utz.de](http://www.utz.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Eingebettete Systeme im Kraftfahrzeug</b>	<b>5</b>
2.1	Die Automobilbranche im Wandel . . . . .	6
2.1.1	Wettbewerbssituation . . . . .	6
2.1.2	Von der Mechanik zur Mechatronik: Innovationsenabler E/E . . .	7
2.1.3	Charakteristika automobiler Entwicklungsprojekte . . . . .	8
2.1.4	Innovationsrisiko Qualität . . . . .	11
2.1.5	Fazit . . . . .	11
2.2	Eigenschaften eingebetteter Systeme im Kraftfahrzeug . . . . .	12
2.2.1	Der Systembegriff . . . . .	12
2.2.2	Charakterisierung eingebetteter Systeme . . . . .	14
2.2.3	Merkmalsausprägungen im Kraftfahrzeug . . . . .	17
2.2.4	Verteilte Systeme — Gesamtvernetzung im Kraftfahrzeug . . . .	20
2.2.5	Fazit . . . . .	26
2.3	Entwicklung eingebetteter Systeme im Kraftfahrzeug . . . . .	27
2.3.1	Fahrzeugentwicklungsphasen und Prototypen . . . . .	27
2.3.2	Entwicklung nach dem V-Modell . . . . .	28
2.3.3	Automobilhersteller vs. Zulieferer . . . . .	31
2.3.4	Fazit . . . . .	32
2.4	Test elektronischer Steuergeräte . . . . .	32
2.4.1	Analytische Qualitätssicherung — Testen . . . . .	32
2.4.2	Testen im Entwicklungsprozess . . . . .	35
2.4.3	Testsysteme . . . . .	43
2.4.4	Phasenmodell für Tests auf Systemebene . . . . .	51

2.4.5	Fazit . . . . .	55
2.5	Bearbeitetes Problem und Aufgabenstellung . . . . .	56
2.5.1	Analyse der Voraussetzungen zur Durchführung von Integrations- und Systemtests . . . . .	56
2.5.2	Aufgabenstellung . . . . .	61
<b>3</b>	<b>Bewertung bestehender Methoden zur Erstellung virtueller Steuergeräte</b>	<b>65</b>
3.1	Anforderungen . . . . .	66
3.1.1	Anforderungen an virtuelle Steuergeräte . . . . .	66
3.1.2	Anforderungen an den Erstellungs- und Betriebsprozess . . . . .	70
3.1.3	Beschränkung auf HIL-Testsysteme . . . . .	71
3.2	Methoden aus dem Automobilbereich . . . . .	72
3.2.1	Nachbildung des Kommunikationsverhaltens — Restbussimulation . . . . .	72
3.2.2	Verfahren der Steuergeräte-Applikationsentwicklung . . . . .	76
3.2.3	Formale Spezifikationen als virtuelle Steuergeräte . . . . .	82
3.3	Methoden aus angrenzenden Domänen . . . . .	83
3.3.1	Testtreiber und Platzhalter in der Softwaretechnik . . . . .	83
3.3.2	Automatische Synthese von Zustandsautomaten aus Message Sequence Charts . . . . .	86
3.4	Bewertung und Lösungssynthese . . . . .	89
3.4.1	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Methoden . . . . .	89
3.4.2	Lösungsansatz . . . . .	91
3.4.3	Ausblick und Ausgrenzung der Telematik . . . . .	95
<b>4</b>	<b>Anforderungen als Bestandteil formal beschriebener Testfälle</b>	<b>99</b>
4.1	Formale Beschreibung von Testfällen für eingebettete Systeme . . . . .	100
4.1.1	Anbindung an das Testsystem — Signale, Botschaften, Datentypen . . . . .	101
4.1.2	Standard-Sprachelemente zur Datenverarbeitung und Ablaufsteuerung . . . . .	103
4.1.3	Integration der Zeit . . . . .	107
4.1.4	Integration von nebenläufigem Verhalten . . . . .	109
4.1.5	Ausführungsmodell . . . . .	109
4.1.6	Automatisierte Ergebnisbeurteilung . . . . .	111

---

4.1.7	Abbildbarkeit typischer Testfälle . . . . .	113
4.1.8	Fazit . . . . .	115
4.2	Beschreibung von Anforderungen . . . . .	115
4.2.1	Konkrete und abstrakte Anforderungen . . . . .	116
4.2.2	Zusammenhang zwischen Testablaufbeschreibung und Anforderungen . . . . .	119
4.2.3	Darstellung von Anforderungen . . . . .	122
4.2.4	Allgemeine Strukturmerkmale von Anforderungen . . . . .	128
4.2.5	Formales Beschreibungsmodell . . . . .	129
4.2.6	Fazit . . . . .	130
4.3	Richtlinien zur formalen Testbeschreibung . . . . .	131
4.3.1	Verzicht auf implizite Beurteilungen . . . . .	131
4.3.2	Forderung nach zeitnaher Ergebnisbeurteilung . . . . .	133
4.4	Tayloring von Anforderungen . . . . .	140
4.4.1	Zeitbedingte Einschränkung von Freiheitsgraden bei der Umsetzung von Anforderungen . . . . .	141
4.4.2	Topologiebedingte Einschränkung von Freiheitsgraden bei der Umsetzung von Anforderungen . . . . .	143
4.4.3	Fazit . . . . .	147
4.5	Automatisierte Identifikation abstrakter Anforderungen . . . . .	149
4.5.1	Datenflussanalyse . . . . .	149
4.5.2	Datenflussgleichungen linearer Kontrollstrukturen sequenzieller, imperativer Programmiersprachen . . . . .	157
4.5.3	Konservativer Charakter der Datenflussgleichungen . . . . .	162
4.5.4	Nebenläufigkeiten . . . . .	164
4.5.5	Algorithmen zur Datenflussanalyse . . . . .	167
4.5.6	Konstruktion abstrakter Anforderungen . . . . .	172
4.5.7	Fazit . . . . .	176
4.6	Zusammenfassung . . . . .	176
<b>5</b>	<b>Virtuelle Steuergeräte durch synchrone Realisierung von Anforderungen</b> 179	
5.1	Konkretisierung von Anforderungen . . . . .	180
5.1.1	Synthese konkreter Anforderungen mit Hilfe von Ablaufprotokollen . . . . .	181

5.1.2	Rechtzeitige Ermittlung der Ablaufprotokoll-Einträge . . . . .	189
5.1.3	Test-Instrumentierung . . . . .	190
5.2	Ableitung eines möglichen Systemverhaltens aus konkreten Anforderungen . . . . .	194
5.2.1	Ableitung von Restriktionen für anforderungsrelevante Systemgrößen — Vorgehensskizze . . . . .	194
5.2.2	Auswertung des binären Teils einer Anforderung . . . . .	198
5.2.3	Ableitung von möglichen Wertebereichen für anforderungsrelevante Systemgrößen durch Propagation von Zwangsbedingungen . . . . .	200
5.2.4	Intervall-CSPs mit Zyklen . . . . .	209
5.2.5	Berechnung konkreter Vorgabewerte für Systemgrößen . . . . .	216
5.2.6	Umgang mit korrelierten Anforderungen . . . . .	217
5.2.7	Integration von Zeitvorgaben . . . . .	218
5.3	Umsetzung von Vorgabewerten für anforderungsrelevante Systemgrößen . . . . .	226
5.3.1	Unabhängige physikalische Systemgrößen . . . . .	226
5.3.2	Abhängige physikalische Systemgrößen . . . . .	228
5.3.3	Systemgrößen aus Botschaften . . . . .	234
5.4	Zusammenfassung . . . . .	242
<b>6</b>	<b>Realisierung und Bewertung</b> . . . . .	<b>245</b>
6.1	Softwarearchitektur . . . . .	245
6.1.1	Ausgangspunkt: Architektur eines HIL-Testsystems . . . . .	246
6.1.2	Integration der Elemente zur Steuergerätesimulation . . . . .	248
6.1.3	Inbetriebnahme und Durchführung von Tests — Arbeitsablauf . . . . .	256
6.2	Struktur realer Anforderungen . . . . .	257
6.2.1	Analyse formal beschriebener Testfälle . . . . .	257
6.2.2	Diskussion . . . . .	258
6.2.3	Schlussfolgerung . . . . .	259
6.3	Anwendungsbeispiel 1: Blinken . . . . .	259
6.3.1	Vorstellung des Testfalls . . . . .	259
6.3.2	Simulationsdurchführung . . . . .	262
6.3.3	Ergebnisse . . . . .	263
6.4	Anwendungsbeispiel 2: Tempomat . . . . .	265
6.4.1	Vorstellung des Testfalls . . . . .	265

---

6.4.2	Simulationsdurchführung . . . . .	268
6.4.3	Ergebnisse . . . . .	270
6.5	Bewertung . . . . .	276
6.5.1	Erfüllung der Anforderungen an virtuelle Steuergeräte . . . . .	276
6.5.2	Erfüllung der Anforderungen an den Erstellungs- und Betriebsprozess . . . . .	279
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>285</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>291</b>





# 1 Einleitung

## Motivation

Moderne Automobile sind in zunehmendem Maße von Elektrik und Elektronik (E/E) durchdrungen. Bezeichnend für diese Entwicklung ist die kontinuierliche Zunahme des Wertschöpfungsanteils der E/E am Fahrzeug, welcher in den letzten Jahre in Automobilen der Oberklasse auf etwa 40% angewachsen ist. Aktuelle Prognosen zufolge wird sich dieser Vormarsch der E/E auch zukünftig weiter fortsetzen [BMW03].

Wesentliche Gründe für diesen Trend liegen darin, dass mit Hilfe der E/E sowohl gänzlich neue Fahrzeugfunktionen entwickelt als auch bestehende Funktionen, die bisher überwiegend mechanisch implementiert wurden, effizienter realisiert werden können. 80% der zukünftigen Innovationen im Automobilbereich, so schätzt man, werden von der E/E beeinflusst sein [AE01b]. Sie spielt daher eine Schlüsselrolle bei der Erfüllung der steigenden gesellschaftlichen und gesetzlichen Anforderungen in den Bereichen Komfort, Spritökonomie, Umweltschutz und Sicherheit und ist für die Hersteller mittlerweile zu einem wesentlichen Wettbewerbsfaktor avanciert.

Der Großteil der Fahrzeugfunktionen wird heutzutage mit Hilfe eingebetteter Systeme softwarebasiert implementiert. Innovationen können auf diese Weise rasch und preisgünstig umgesetzt werden. Automobile des Oberklassensegments enthalten zwischen 50 und 80 dieser elektronischen Steuergeräte, von denen ein zunehmender Anteil über Kommunikationsbusse interagiert [EP01].

Die rasche Zunahme von Funktionen und wechselwirkenden Komponenten im Automobil ist untrennbar mit einem Anwachsen der Fahrzeugkomplexität verbunden. Vergleichbares gilt für die entsprechenden Entwicklungsprozesse. Um dennoch ihre

Produkte hinreichend absichern zu können, wird es für die Automobilhersteller zunehmend wichtig, bei der Entwicklung einer neuen Baureihe so früh wie möglich mit testenden Aktivitäten zu beginnen. Die Notwendigkeit hierzu wird durch immer kürzer werdende Entwicklungszeiten verstärkt.

Zum frühzeitigen Test von Fahrzeugfunktionen leisten Hardware-in-the-Loop (HIL)-Simulatoren einen wichtigen Beitrag. Mit ihrer Hilfe können elektronische Steuergeräte getestet werden, ohne dass deren technisches Umfeld real zur Verfügung steht. Dies ist in frühen Phasen einer Baureihenentwicklung bedeutsam, in denen ggf. noch keine geeigneten Fahrzeugprototypen existieren. Zudem ermöglichen HIL-Testsysteme eine weit reichende Testautomation und sind deswegen zur systematischen Durchführung entwicklungsbegleitender Regressionstests unverzichtbar.

Aufgrund der Vernetzung elektronischer Steuergeräte muss zusätzlich zum Test einzelner Komponenten eine Absicherung steuergeräteübergreifender Funktionsumfänge durchgeführt werden. Dies erfolgt im Rahmen von Integrations- und Systemtests der Gerätenetzwerke. In frühen Entwicklungsphasen besteht jedoch die Gefahr, dass noch nicht alle hierfür benötigten Steuergeräte gleichzeitig zur Verfügung stehen. Um die vorhandenen Geräte dennoch frühestmöglich weitgehend uneingeschränkt testen zu können, muss das hierfür relevante Verhalten der fehlenden Komponenten simulativ-technisch nachgebildet werden.

An diesem Punkt setzt die vorliegende Arbeit an: Sie hat die Entwicklung eines Verfahrens zum Ziel, welches eine systematische und effiziente Erstellung virtueller Steuergeräte für HIL-Tests von Gerätenetzwerken ermöglicht.

Damit verbunden ist eine Erörterung der folgenden Fragestellungen:

- Welche Funktionsumfänge eines fehlenden Steuergerätes müssen mit welchem Detaillierungsgrad nachgebildet werden?
- Wie kann eine Nachbildung dieser relevanten Umfänge mit möglichst geringem Aufwand erfolgen? Dies ist u. a. deswegen bedeutsam, weil ein Steuergerätemodell lediglich für kurze Zeit eingesetzt wird, bis die entsprechende reale Komponente zur Verfügung steht.
- Wie kann das Verfahren in Anbetracht der Komplexität elektronischer Steuergeräte handhabbar und beherrschbar gehalten werden?
- Wie können die entwickelten virtuellen Steuergeräte in HIL-Testsysteme integriert und zur Ausführung gebracht werden?
- Wie kann eine rechtzeitige Bereitstellung der virtuellen Steuergeräte gewährleistet werden? Da sie in frühen Phasen der Entwicklung benötigt werden, muss ihre Erstellung hinreichend schnell durchgeführt werden können.

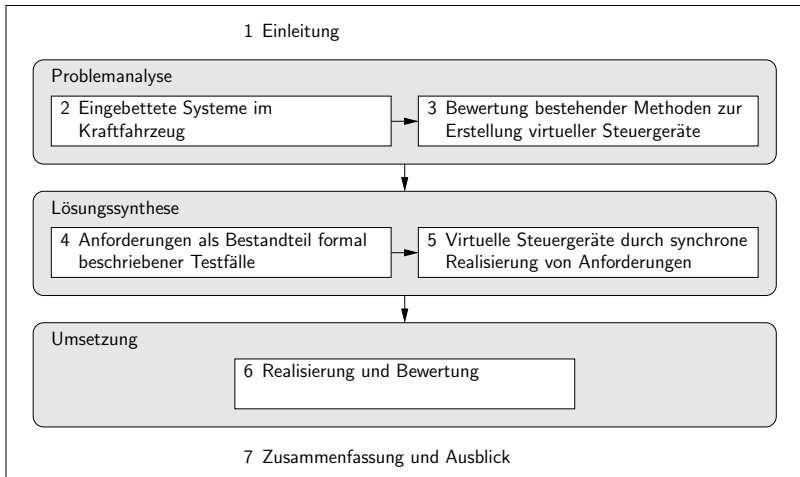


Abbildung 1.1: Gliederung der Arbeit.

## Gliederung

Die Gliederung der vorliegenden Arbeit ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Sie umfasst die Themenkomplexe Problemanalyse, Lösungssynthese und Umsetzung:

Kapitel 2 dient der Hinführung auf die bearbeitete Problemstellung. Zunächst wird auf die aktuelle Bedeutung der E/E für die Automobilbranche eingegangen. Anschließend werden elektronische Steuergeräte charakterisiert und deren Entwicklungsprozess sowie deren Test beschrieben. Letzteres beinhaltet eine Vorstellung der verschiedenen Teststufen des V-Modells sowie eine Diskussion der für Tests von Gerätenetzwerken relevanten Testsysteme. Die Notwendigkeit einer frühestmöglichen Testdurchführung wird motiviert und daraus der Bedarf an virtuellen Steuergeräten zur Absicherung der Durchführbarkeit von Integrations- und Systemtests in frühen Entwicklungsphasen abgeleitet.

Im dritten Kapitel werden Anforderungen formuliert, denen virtuelle Steuergeräte sowie die zugehörigen Prozesse zu deren Erstellung genügen müssen. Nachfolgend werden Methoden aus der Automobilbranche und angrenzenden Domänen vorgestellt, die grundsätzlich zur Erstellung virtueller Steuergeräte herangezogen werden können. Diese werden anhand der Anforderungen bewertet und auf Konzepte hin untersucht, die zur Lösung der bearbeiteten Aufgabenstellung beitragen könnten. Unter Berücksichtigung bestehender Ansätze wird anschließend ein neues Lösungskonzept zur Nachbildung von Steuergeräten für HIL-Tests von Gerätenetzwerken entworfen. Dessen Grundgedanke besteht darin, das in einem formal beschriebenen Integrations- bzw. Systemtest enthaltene Wissen um das Sollverhalten eines bestimmten Gerätes

zu identifizieren und im Bedarfsfall — wenn die jeweilige Komponente real nicht zur Verfügung steht — während der Ausführung des betreffenden Tests zu realisieren.

In Kapitel 4 wird analysiert, in welcher Form das Sollverhalten eines Steuergerätes in einem Integrations- bzw. Systemtest enthalten ist und wie dieses in Gestalt formalisierter Anforderungen an die betreffende Komponente automatisiert identifiziert werden kann. Voraussetzung hierfür ist eine formale Beschreibung von Tests, die zu Beginn des Kapitels festgelegt wird.

Die rechtzeitige, automatisierte Umsetzung der identifizierten Anforderungen an ein Steuergerät während der Testausführung ist Gegenstand von Kapitel 5.

Kapitel 6 befasst sich mit der praktischen Anwendung des entwickelten Verfahrens. Zunächst wird beschrieben, wie die zur Steuergerätenachbildung erforderlichen Elemente in die Architektur eines HIL-Testsystems integriert werden können. Hiernach wird für zwei repräsentative Testfälle aus unterschiedlichen Fahrzeugdomänen die Simulation eines Steuergerätes durchgeführt. Die im Zuge dessen gewonnenen Einsichten bilden die Grundlage für die abschließende Bewertung des hier erarbeiteten Verfahrens zur Erstellung virtueller Steuergeräte.

Eine Zusammenfassung der erreichten Ergebnisse sowie ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen runden diese Arbeit in Kapitel 7 ab.