

Klaus Lamberg

**Methodik zur systematischen  
Bereitstellung von HIL-Testsystemen  
für Kfz-Steuergeräte**

Herausgegeben von

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

in der Reihe

**Informationstechnik im Maschinenwesen**



**Herbert Utz Verlag · Wissenschaft**  
**München 2001**

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist  
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2001

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 2001

ISBN 3-89675-692-3

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

# Inhaltsverzeichnis

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1        | Motivation  | 1         |
| 1.2        | Aufbau der Arbeit   | 3         |
| <b>2</b>   | <b>Hardware-in-the-Loop-Simulation in der Kfz-Elektronikentwicklung</b> | <b>5</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>Elektronik im Kraftfahrzeug</b>                                      | <b>5</b>  |
| 2.1.1      | Elektronische Fahrzeugsysteme   | 6         |
| 2.1.2      | Signalübertragung im Kraftfahrzeug                                      | 8         |
| 2.1.3      | Entwicklungsprozeß der Kfz-Elektronik                                   | 10        |
| <b>2.2</b> | <b>Hardware-in-the-Loop-Testsysteme</b>                                 | <b>12</b> |
| 2.2.1      | Hardware-in-the-Loop-Simulation   | 12        |
| 2.2.2      | Simulationsmodelle  | 16        |
| 2.2.3      | Benutzerschnittstelle   | 20        |
| 2.2.4      | Sensor- und Aktorsimulation   | 21        |
| 2.2.5      | Funktionen für den Test von Steuergeräten                               | 22        |
| 2.2.6      | Komplexität von HIL-Testsystemen  | 23        |
| <b>2.3</b> | <b>Entwicklung von HIL-Testsystemen</b>                                 | <b>24</b> |
| 2.3.1      | Spezialwissen und Aufgabenteilung                                       | 24        |
| 2.3.2      | Verschiebung der Aufgabenstellung                                       | 26        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 2.3.3      | Ziel der Arbeit   | 29        |
| <b>3</b>   | <b>Komplexitätsbeherrschung</b>                                 | <b>31</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Systemtechnische Grundlagen und Operationalisierung</b>      | <b>31</b> |
| 3.1.1      | Der Systembegriff   | 31        |
| 3.1.2      | Allgemeine Prinzipien zur Systembeherrschung                    | 35        |
| 3.1.3      | Modellbildung und Simulation                                    | 39        |
| <b>3.2</b> | <b>Einordnung und Abgrenzung der Problemstellung</b>            | <b>42</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Prozeßmodelle</b>  | <b>45</b> |
| 3.3.1      | Wasserfallmodell  | 46        |
| 3.3.2      | V-Modell  | 47        |
| <b>3.4</b> | <b>Systemmodellierung</b>                                       | <b>48</b> |
| 3.4.1      | Modellierungsmethoden und Beschreibungssprachen                 | 49        |
| 3.4.2      | Einsatz der Systemmodellierung in der Kfz-Elektronikentwicklung | 53        |
| 3.4.3      | PDM- / EDM-Systeme  | 55        |
| <b>3.5</b> | <b>Bewertung und Lösungsansatz</b>                              | <b>56</b> |
| <b>4</b>   | <b>Komponentenorientierte Beschreibung von HIL-Testsystemen</b> | <b>61</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Vorüberlegungen</b>  | <b>61</b> |
| 4.1.1      | Anforderungen an eine Beschreibung von HIL-Testsystemen         | 61        |
| 4.1.2      | Generische vs. komponentenorientierte Struktur                  | 63        |
| <b>4.2</b> | <b>Virtuelle Fahrzeugkomponenten</b>                            | <b>63</b> |
| 4.2.1      | Das virtuelle Fahrzeug  | 64        |
| 4.2.2      | Dekomposition des virtuellen Fahrzeugs                          | 64        |
| 4.2.3      | Klassifikation virtueller Fahrzeugkomponenten                   | 66        |
| 4.2.4      | Realisierung virtueller Fahrzeugkomponenten                     | 68        |
| <b>4.3</b> | <b>Schnittstellen virtueller Fahrzeugkomponenten</b>            | <b>69</b> |

|                  |  |            |
|------------------|--|------------|
| 4.3.1            | Prozeßsignalschnittstelle                                | 70         |
| 4.3.2            | Testschnittstelle  | 73         |
| 4.3.3            | Konfigurationsschnittstelle                              | 77         |
| <b>4.4</b>       | <b>Komponentendatenblatt</b>                             | <b>78</b>  |
| <b>4.5</b>       | <b>Zusammenfassung</b>                                   | <b>80</b>  |
| <b>5</b>         | <b>Systematische Bereitstellung von HIL-Testsystemen</b> | <b>83</b>  |
| <b>5.1</b>       | <b>Systematisierung der HIL-Testsystementwicklung</b>    | <b>83</b>  |
| 5.1.1            | Das virtuelle Fahrzeug als Produktmodell                 | 83         |
| 5.1.2            | Informationsübergabe zwischen den Prozeßphasen           | 85         |
| <b>5.2</b>       | <b>Projektierung von HIL-Testsystemen</b>                | <b>88</b>  |
| 5.2.1            | Definitionsphase: Konfigurieren des virtuellen Fahrzeugs | 88         |
| 5.2.2            | Spezifikationsphase: Transformation der Anforderungen    | 90         |
| 5.2.3            | Implementierungsphase und Integrationsphase              | 91         |
| 5.2.4            | Wartungs- und Pflegephase                                | 92         |
| <b>5.3</b>       | <b>Zusammenfassung</b>                                   | <b>93</b>  |
| <b>6</b>         | <b>Zusammenfassung und Bewertung</b>                     | <b>95</b>  |
| <b>6.1</b>       | <b>Zusammenfassung</b>                                   | <b>95</b>  |
| <b>6.2</b>       | <b>Diskussion und Bewertung der Lösung</b>               | <b>96</b>  |
| 6.2.1            | Betrachtung der Anwendbarkeit                            | 96         |
| 6.2.2            | Vor- und Nachteile der Lösung                            | 97         |
| 6.2.3            | Bewertung der Lösung                                     | 99         |
| <b>6.3</b>       | <b>Reflexion der Arbeit</b>                              | <b>100</b> |
| <b>Literatur</b> |  | <b>103</b> |

**Abbildungsverzeichnis** **113**

**Glossar** **115**

## Kapitel 1

# Einleitung

## 1.1 Motivation

„Die Elektronik ist heute die Schlüsseltechnologie für das moderne Auto“ (GAUS98). Dieser Satz zeigt, welche Bedeutung die Elektronik für die Kraftfahrzeugtechnik nicht nur heute, sondern auch in Zukunft hat und haben wird. Der Anteil der Elektrik und Elektronik an den Herstellungskosten von Kraftfahrzeugen beträgt heute ca. 25 bis 30 Prozent, mit steigender Tendenz (HÖFLING99). Dies ist umso höher zu bewerten, wenn berücksichtigt wird, daß gleichzeitig die Kosten für die Realisierung elektronischer Fahrzeugfunktionen immer weiter sinken (DUNCAN96). Auch im Vergleich mit anderen Elektronikbranchen ist die herausragende Rolle der Kraftfahrzeug-Elektronik erkennbar. Im Jahr 1998 hat die Kraftfahrzeug-Elektronik Platz eins bei den Abnehmern der deutschen Bauelemente-Industrie erreicht, mehr als die Unterhaltungselektronik, die Datentechnik, die Telekommunikation, die Industrie-Elektronik und sonstige Konsumgüter. Gleichzeitig hat sie mit 20 Prozent auf 3,37 Mrd. Euro den größten Wachstums-Anteil von 1997 auf 1998 erzielt (AUTO99).

Ist die Kraftfahrzeug-Elektronik schon heute prägend für die Funktionalität im Automobil, so wird sie in der Zukunft immer wichtiger werden. Konventionelle Funktionen im Fahrzeug werden zunehmend „elektronifiziert“ (HÖFLING99). Zukünftig werden 90 Prozent aller Innovationen im wesentlichen durch die Elektronik realisiert werden (HOFMANN00). „Schlüsseltechnologie“ bedeutet in diesem Zusammenhang also auch Schlüssel für die Zukunft. Die Leistungsfähigkeit zukünftiger Fahrzeuggenerationen hinsichtlich Sicherheit, Komfort, Umweltverträglichkeit und Qualität wird maßgeblich durch die Leistungsfähigkeit der verfügbaren Elektroniksysteme bestimmt werden.

Die dargestellten Zahlen sind beeindruckend. Die Kraftfahrzeugtechnik ist heute mehr denn je durch ein massives Wachstum der Bedeutung und des Einsatzes von Elektronik geprägt. Insbesondere die steigende Zahl elektronischer Steuergeräte und ihre Vernetzung mittels Bussystemen führt zu einer exponentiellen Erhöhung der Komplexität elektronischer Fahrzeugsysteme (NEUMANN98). Diese Entwicklung bringt jedoch auch Probleme mit sich. Die durch die Elektronik verursachten Garantie- und Kulanzkosten betragen heute schon 15 Prozent. Der durch Elektronik verursachte Anteil an Liegen-

bleibern (Fahrzeuge, die nicht mit eigener Kraft die Werkstatt erreichen können) beträgt sogar 30 Prozent. Dies stellt „neue, erweiterte Anforderungen an den Automobilentwickler und hinsichtlich Komponentenentwicklung an den Systemlieferanten“. Eine der wichtigsten Anforderungen ist somit die Zuverlässigkeit der Systeme (GAUS98).

Die Dynamik, mit der die Elektronik- und Software-Umfänge wachsen, bedeutet daher eine große Herausforderung für die Automobilindustrie, insbesondere hinsichtlich der Prozeßketten (HÖFLING99). Beispiele für veränderte Prozesse sind neue Methoden der Zusammenarbeit zwischen Hersteller und Zulieferer durch „Software-Sharing“ (RUNGE97). Dabei produzieren unabhängige Systemhäuser die Software, die nicht wettbewerbsrelevant ist, wie z.B. das Betriebssystem oder Treiber für Diagnose und Kommunikation. Diese wird dann von allen beteiligten Zulieferern und Automobilherstellern eingesetzt (MERKLE96).

Neben der Veränderung der Entwicklungsprozesse werden zusätzlich Werkzeuge und Technologien benötigt, welche die Entwicklung von Fahrzeugsteuergeräten vor dem Hintergrund ihrer Komplexität unterstützen. Ein Beispiel dafür ist der zunehmende Einsatz der Simulationstechnik im Entwicklungsprozeß. Mit Hilfe der Simulationstechnik ist es möglich, Entwicklungszeiten zu verkürzen, weil wesentliche Aufwände und Tätigkeiten in frühe Entwicklungsphasen verlegt werden (RUNGE97). Dies erfolgt beispielsweise durch Simulation der Fahrzeugumgebung und des Fahrzeugs zur Überprüfung der Elektronik. In zunehmenden Maße wird dazu – sowohl beim Zulieferer als auch beim Automobilhersteller – die Hardware-in-the-Loop-Simulation (HIL-Simulation) eingesetzt. Dabei werden reale Fahrzeugsteuergeräte bzw. -prototypen mit Echtzeit-Simulationsmodellen des Fahrzeugs und der Fahrzeugumgebung verbunden. Die HIL-Simulation erlaubt so eine Verifikation der Zielimplementierung, also der Funktionen im Steuergerät innerhalb des geschlossenen Regelkreises (BENNINGER96) und die gefahrlose, aufwandsarme und reproduzierbare Durchführung von zum Teil gefährlichen oder im realen Fahrzeug nur schwer zu realisierenden Erprobungsszenarien. Die abschließende Abstimmung im Fahrversuch wird dadurch wesentlich aufwandsärmer, da entscheidende Vorarbeiten bereits im Labor geleistet wurden (RUNGE97). Zusätzlich erschließt sich aus der Automatisierung, also dem automatischen Durchlaufen vordefinierter Testzyklen und –programme das volle Anwendungspotential der HIL-Simulation. Der HIL-Simulator wird zum HIL-Testsystem. Damit sind systematische und automatisierte Tests sämtlicher Steuergeräte sowohl als einzelne Komponenten, wie auch im Gesamtsystem möglich.

An HIL-Testsysteme stellen sich drei wesentliche Anforderungen. Zunächst muß das Simulationsmodell das Verhalten der realen Umgebung des Steuergeräts vollständig nachbilden. Alle Größen, die einen Einfluß auf das Verhalten des Steuergeräts haben, sind zu simulieren. Die Simulation selbst muß in Echtzeit erfolgen, um sicherzustellen, daß Simulation und reales Steuergerät auf derselben Zeitbasis arbeiten. Schließlich muß das in der Echtzeitsimulation ermittelte Fahrzeugverhalten bis auf die elektrische Schnittstelle des Steuergeräts abgebildet und müssen umgekehrt die Signale des Steuergeräts von ihrer elektrischen Schnittstelle bis in das Simulationsmodell übertragen werden. Dies erfordert neben dem Einsatz spezieller, teilweise programmierbarer I/O-Karten, Maßnahmen wie elektrische Pegelwandlung und Lastsimulation. HIL-Testsysteme sind anwendungsspezifisch, jedes System ist in weiten Teilen individuell zu entwickeln (BECHBERGER99). Von Version zu Version ist und von Variante zu Variante

ändert sich gegebenenfalls die Pinbelegung des Steuergeräts und somit Teile des Testsystems. Außerdem erfordern unterschiedliche Funktionsstände der Steuergerätesoftware den Einsatz unterschiedlicher Modelle, und die Entwicklung und die Durchführung stets wachsender Testprogrammumfänge.

Der zunehmende Einsatz der HIL-Simulation führt zu einer wachsenden Zahl von HIL-Testsystemen, die gleichzeitig entwickelt, gepflegt, erweitert und angewendet werden. Es entsteht ein Testsystempark. Dieser besteht aus einzelnen, anwendungsbedingt verschiedenen Individualsystemen. Die Komplexität der zu testenden Elektroniksysteme überträgt sich auf die Entwicklungswerkzeuge, also die HIL-Testsysteme. Um diese Komplexität vor dem Hintergrund der wachsenden Anforderungen an kürzere Entwicklungszyklen und steigende Qualität – denn auch diese übertragen sich auf die HIL-Testsystementwicklung – zu bewältigen, bedarf es wiederum geeigneter Mittel und Methoden seitens der Werkzeugentwicklung. Geeignete Lösungen betreffen einerseits die Beherrschbarmachung der Komplexität der HIL-Testsysteme und der Testsystemparks als Gesamtheit und andererseits die Entwicklung einer definierten Vorgehensweise, die sich dieser Mittel bedient und sie effizient anwendet. Eine Lösung für die systematische Bereitstellung von HIL-Testsystemen für den Test elektronischer Fahrzeugsysteme unter Berücksichtigung der Komplexität von HIL-Testsystemen ist Inhalt dieser Arbeit.

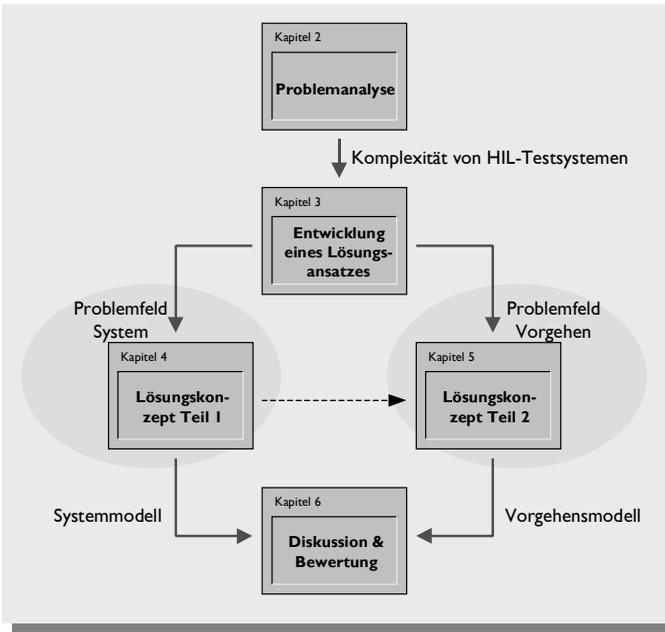
## 1.2 Aufbau der Arbeit

Abbildung 1.1 zeigt den Aufbau der Arbeit.

In Kapitel 2 wird zunächst das Umfeld der HIL-Testsystementwicklung innerhalb der automobilen Elektronikentwicklung beleuchtet. Insbesondere jene für die HIL-Simulation wesentlichen Merkmale der Signalübertragung im Kraftfahrzeug werden dargestellt. Daraus leiten sich mit der Vollständigkeit, der elektrischen Unmittelbarkeit und der Echtzeit die wichtigsten Anforderungen an die HIL-Simulation ab. Anschließend erfolgt eine so weit wie möglich allgemeine Beschreibung von HIL-Testsystemen. Dabei werden beispielhafte Realisierungsmöglichkeiten aufgezeigt, welche die Vielfalt der eingesetzten konkreten Systemrealisierungen deutlich machen.

Im Anschluß an eine Darstellung der heutigen Vorgehensweise bei der Bereitstellung von HIL-Testsystemen werden die dabei auftretenden Probleme geschildert. Zur Untersuchung der eigentlichen Ursachen wird auch die Software-Technik herangezogen, in der ähnliche Probleme schon seit vielen Jahren bekannt sind. Aus diesen Betrachtungen heraus werden die aktuelle, in dieser Arbeit zu behandelnde Problematik und das Ziel dieser Arbeit formuliert.

In Kapitel 3 erfolgt nach einer begrifflichen Grundlegung und der Einordnung der behandelten Thematik in den Gesamtkontext die Suche nach einem Lösungsansatz anhand des Stands der Technik. Dabei werden sowohl bereits bekannte und bewährte Methoden und Sprachen der Systemmodellierung als auch die wichtigsten Prozeßmodelle dargestellt. Auch die Einflüsse und Einsatzgebiete von Modellierungssprachen im Umfeld der automobilen Elektronikentwicklung werden in die Betrachtungen einbezogen. Insbesondere der Ansatz eines Produktmodells als einer Beschreibung des zu entwickelnden Systems und dessen Konkretisierung im Verlaufe der Entwicklung gibt den wesentlichen Impuls für den Ansatz der Arbeit.



**Abbildung I.1: Aufbau der Arbeit**

Das in dieser Arbeit entwickelte Lösungskonzept ist zweiteilig. Es besteht einerseits aus einem Systemmodell zur Beschreibung von HIL-Testsystemen und andererseits aus einem Vorgehensmodell, welches sich das Systemmodell zu Nutze macht.

Zur Entwicklung eines geeigneten Konzepts für die Beschreibung von HIL-Testsystemen in Kapitel 4 werden zunächst die Anforderungen an eine solche Beschreibungsmethodik aufgestellt und es wird der grundlegende und für diese Arbeit zentrale Begriff des virtuellen Fahrzeugs entwickelt. Ergebnis des Kapitels ist eine Methodik, wie Systeme dieser Kategorie vor dem Hintergrund der bestehenden Anforderungen erfaßt und beherrscht werden können.

Der zweite Teil der Lösungsentwicklung besteht in der Entwicklung einer Vorgehenssystematik für die Bereitstellung von HIL-Testsystemen in Kapitel 5. Der dem zugrunde liegende Ansatz ist durch die Idee bestimmt, das virtuelle Fahrzeug als Produktmodell zu verstehen und es in den zu schaffenden Prozeß zu integrieren. Als Ergebnis liegt die Neuordnung des Entwicklungs- bzw. Bereitstellungsprozesses für HIL-Testsysteme vor, die auf der schrittweisen Konkretisierung des virtuellen Fahrzeugs basiert.

Abschließend wird in Kapitel 6 die in den Kapiteln 4 und 5 entwickelte Lösung anhand der Betrachtung der Anwendbarkeit und der Abwägung der Vor- und Nachteile zusammenfassend bewertet. Eine Bewertung der Arbeit als Ganzes bildet den Abschluß.