

Thies Filler

Entwicklung einer Methodik für die durchgängige Integration von Hardware und Softwaremodellen in Simulationen für Fahrfunktionen

AutoUni – Schriftenreihe

Band 139

Reihe herausgegeben von/Edited by
Volkswagen Aktiengesellschaft
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

Reihe herausgegeben von/Edited by

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

Thies Filler

Entwicklung einer
Methodik für die
durchgängige
Integration von
Hardware und
Softwaremodellen
in Simulationen für
Fahrfunktionen

 Springer

Thies Filler
AutoUni
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2019

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

AutoUni – Schriftenreihe
ISBN 978-3-658-26307-2 ISBN 978-3-658-26308-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-26308-9>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Danksagung

Zunächst danke ich Frau Prof. Dr.-Ing. Helena Szczerbicka für ihr Engagement und die investierte Zeit im Rahmen der wissenschaftlichen Betreuung meiner Arbeit. Besonders die fachlichen Diskussionen und das wertvolle Feedback waren mir eine große Unterstützung.

Des Weiteren gilt mein Dank meinem Betreuer bei der Volkswagen AG. Er stand während meiner gesamten Bearbeitungszeit stets mit Engagement für Fragen und fachliche Diskussionen zur Verfügung und gab wertvolle Denkanstöße und Hinweise.

Mein Dank gilt zudem meinen Kolleginnen und Kollegen in der Abteilung. Über die Abteilung hinaus unterstützten mich insbesondere die Kollegen aus dem Fachbereich der Fahrwerksentwicklung mit fachlichem Austausch.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei meinen früheren Masteranden, die mit großer Begeisterung an der Umsetzung von Inhalten dieser Arbeit mitgewirkt haben.

Zudem danke ich Mitarbeitern von der Firma Model Engineering Solutions für die Durchführung von modellbasierten Tests und Mitarbeitern von der Firma Tesis für die Unterstützung bei der Durchführung von Simulationen.

Überdies danke ich meiner Familie und meinen Eltern, die mir das Studium der Informatik ermöglicht und mich bei meiner Dissertation unterstützt haben.

Schließlich danke ich noch meiner Freundin, die mir während der Bearbeitung dieser Arbeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

Thies Filler

Kurzfassung deutsch

Eingebettete Systeme spielen im Alltag eine immer wichtigere Rolle. Dabei steigen sowohl die Leistungsfähigkeit als auch die damit einhergehende Komplexität immer weiter an. Dies spiegelt sich in der Automobilindustrie durch eine steigende Anzahl an Fahrassistenz-, Sicherheits- und Komfortfunktionen für den Kunden wider. Realisiert werden solche Kundenfunktionen oft mithilfe einer Vielzahl von Steuergeräten, die über Bussysteme miteinander kommunizieren. Neben Kundenfunktionen, die sich auf einzelnen Steuergeräten befinden, gibt es zudem vernetzte Kundenfunktionen, deren Bestandteile sich auf verschiedene Steuergeräte verteilen. Darüber hinaus ermöglichen neue Steuergerätearchitekturen, wie beispielsweise AUTOSAR, die Verteilung einzelner Funktionsteile auf verschiedene Steuergeräte. Im Zuge des automatisierten Fahrens nehmen sowohl die Anzahl als auch die Komplexität von vernetzten Kundenfunktionen im Fahrzeug immer mehr zu und führen zu einem hohen Testaufwand.

Für die Beherrschung des Aufwands sollen Tests von Kundenfunktionen zukünftig verstärkt mithilfe von Simulationen durchgeführt werden. Hier werden einzelne Funktionsteile wie z. B. physikalische Bauteile durch Simulationsmodelle abstrahiert, die im Allgemeinen von verschiedenen Zulieferern und Fachabteilungen entwickelt werden.

Diese verteilte Entwicklung erschwert den Aufbau von Gesamtmodellen und sie führt dazu, dass die Simulation von vernetzten Kundenfunktionen nicht immer effizient ist. Herausforderungen bestehen beispielsweise darin, dass Simulationsmodelle für spezifische Fragestellungen erstellt werden. Dennoch ist eine Wiederverwendung dieser Modelle sinnvoll, da sie z. B. für die Beantwortung verschiedener Fragestellungen bzgl. des Bauteilverhaltens genutzt werden können. Darüber hinaus bietet ein Test im frühen Entwicklungsstadium insofern einen Mehrwert, als die Fehlerbehebungskosten geringer ausfallen als zu einem späteren Zeitpunkt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Methode zur durchgängigen Integration von Simulationsmodellen für die Entwicklung vernetzter Kundenfunktionen dargestellt. Die Methode ermöglicht, dass die Modellintegration robuster und effizienter gestaltet werden kann. Sie ist auf die Automobilindustrie zugeschnitten, wobei sich viele Aspekte auf Landmaschinen, Lastkraftwagen oder auch auf die Luft- und Raumfahrttechnik übertragen lassen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Spezifizierung von Anforderungen, Randbedingungen und Modelleigenschaften für verschiedene Testanforderungen von vernetzten Kundenfunktionen. Es wird untersucht, welche Verfahren und Kopplungsmethoden für welche Testanforderungen geeignet sind. Die Arbeit stellt darüber hinaus benötigte Eigenschaften für eine durchgängige Berechnung von Modellen im gesamten Entwicklungsprozess dar, sodass diese z. B. früh auf PCs und später auf Prüfständen mit Echtzeitanforderungen wiederverwendet werden können. Sowohl für die Definition als auch für die Prüfung von Modelleigenschaften werden geeignete Werkzeuge vorgestellt. Die Verwendbarkeit der Forschungsergebnisse wird abschließend anhand einer vernetzten Kundenfunktion nachgewiesen.

Beleuchtet wird in der Arbeit insbesondere die Verwendung der Simulation für die Funktionsentwicklung, da sie als Schlüsseltechnologie für komplexe Kundenfunktionen im Fahrzeug, wie z. B. das automatisierte Fahren, gilt. Die in dieser Arbeit neu entwickelten Strukturierungen bieten die Grundlage für schnellere und effizientere Simulationen von vernetzten Kundenfunktionen.

Kurzfassung englisch

Embedded systems, i.e. as part of a larger system including hardware and mechanical parts, are becoming increasingly important. Within the automotive industry, such systems are found within driver assistance, safety and comfort functions. They are implemented using many electrical control units which communicate using bus systems. Apart from functions which are implemented in a single electrical control unit, there is now a trend towards complex and networked functions, which comprise of multiple electrical control units. Furthermore, new control device architectures - for instance, the AUTOSAR architecture - have emerged that distribute multiple parts of functions to different electrical control units. As we strive towards automated driving, the number of embedded systems and their complexities continue to grow and this requires substantial resources for testing.

It is essential that such embedded systems will have to be tested using simulations, often with real-time computing constraints. Simulation models are developed and provided by a multitude of suppliers, subcontractors and subdivisions. The diversity of the origins and the uncoordinated development is afflicted with a risk for inefficient simulation testing. For example, specific simulation models have been developed only for one purpose or specific functions, whereas a modular structure aiming at a multitude of future test applications would be preferential. It is important to study not only the function of such a system, but also the functioning of the various components. Simulation testing during the development of the components is also preferable as such an approach will reduce the costs for diagnosing errors and malfunctions of complex systems.

This thesis focuses on the integrated simulation models for different testing requirements of complex and networked integrated embedded systems. Various solutions are presented to improve the integration of the systems with the goal to enhance their robustness and efficacy. The method is specifically designed for the automotive industry; however, the concepts can be generalized and used for agricultural machines, trucks, and the aerospace sector. This thesis treats the exact definitions of the requirements, confounding conditions, and model characteristics for networked embedded systems. Moreover, this work focuses on a modular approach of the use of components of such simulation systems for embedded networked systems, including the use of personal computers and tests benches. The work also focuses on the testing of model characteristics with appropriate tools. The applicability of the research results is validated on a specific networked function.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIV
Tabellenverzeichnis	XV
Abkürzungsverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Lösungsansatz	3
1.3.1 Vorgehensweise	4
1.3.2 Ziele der Arbeit	5
1.4 Bezug und Abgrenzung zu verwandten Arbeiten	6
1.5 Aufbau der Arbeit	7
2 Stand der Technik	9
2.1 Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme	9
2.2 Steuergeräte im Fahrzeug	11
2.2.1 Steuergeräte	11
2.2.2 Steuergerätearchitekturen	12
2.2.3 Steuergerätevernetzung im Fahrzeug	14
2.2.4 Entwicklungsprozess von Steuergeräten	15
2.3 Grundlagen der Simulation im Kontext der virtuellen Funktionsabsicherung	20
2.4 Eigenschaften von einzelnen Simulationsmodellen	22
2.5 Co-Simulation	25
2.6 Durchführung von funktionalen Tests und Testverfahren	30
2.7 Begriffe im Kontext der Fahrdynamiksimulationen	32
3 Durchgängiger Aufbau von Simulationsumgebungen für vernetzte Funktionen	35
3.1 Begriffsdefinitionen für eine durchgängige Funktionsentwicklung	36
3.1.1 Strukturgebende Begriffsdefinitionen	36
3.1.2 Aufbau von Simulationen	38
3.2 Analyse der aktuellen Funktionsentwicklung	42
3.2.1 Reifegrade von Funktionen im Entwicklungsprozess	42
3.2.2 Eigenschaften verschiedener XiL-SW-Elemente	43
3.2.3 Erkenntnisse und Potentiale	46
3.3 Testphasen von Funktionen	47
3.3.1 Herleitung der Testphasen	47
3.3.2 Schnittstellentest	48
3.3.3 (Vor-)Applikation	50
3.3.4 Variantentest	51
3.3.5 Bauteilauslegung	51

3.3.6	Abnahmetest	52
3.3.7	Gesamtdarstellung der Testphasen und Ableitung geeigneter Testmethoden	52
3.4	Anforderungen an Simulationsmodelle im Entwicklungsprozess	57
3.4.1	Schnittstellen	57
3.4.2	Kriterien zur Klassifizierung von Modellen	59
3.4.3	Klassifizierung von Modelleigenschaften	64
3.4.4	Validierung vernetzter Modelle	68
3.5	Unterstützende Werkzeuge	71
3.5.1	Testsystemkonfigurator (TSK)	72
3.5.2	Modellanalysewerkzeug (MAW)	83
4	Anwendungsbeispiel	85
4.1	Die vernetzte Funktion Driver Steering Recommendation (DSR)	85
4.2	Manöverbeschreibung der DSR-Funktion	86
4.3	Simulationsaufbau für die DSR-Funktion	87
4.4	Messaufbau und Beschreibung der im Fahrversuch durchgeführten Manöver	88
4.5	Modellkonfiguration beim Durchlauf der Testphasen	90
4.6	Schnittstellentest	92
4.6.1	Darstellung der verwendeten Modelle	92
4.6.2	Ergebnisse	93
4.6.3	Zusammenfassung des Schnittstellentests	95
4.7	Variantentest	95
4.7.1	Darstellung der verwendeten Modelle	95
4.7.2	Ergebnisse	96
4.7.3	Zusammenfassung des Variantentests	98
4.8	Bauteilauslegung	99
4.8.1	Darstellung der verwendeten Modelle	99
4.8.2	Ergebnisse	100
4.8.3	Zusammenfassung der Bauteilauslegung	104
4.9	(Vor-)Applikation	105
4.9.1	Darstellung der verwendeten Modelle	105
4.9.2	Zusammenfassung der (Vor-)Applikation	106
4.10	Abnahmetest	106
4.11	Zusammenfassung des Anwendungsbeispiels	106
4.12	Auswertung der Methodik	107
5	Zusammenfassung	111
6	Fazit	115
7	Ausblick	117
	Literaturverzeichnis	121
	Anhang	129

Abbildungsverzeichnis

1.1	Durchgängiger Entwicklungsprozess für vernetzte Funktionen	4
2.1	V-Modell	10
2.2	Regelkreis	12
2.3	Autosar	13
2.4	V-Modell mit dem Fokus auf der Softwareentwicklung	16
2.5	<i>In-the-Loop</i> -Test einer Implementierung	17
2.6	Co-Simulationen und Schrittweiten	25
2.7	FMI	26
2.8	Co-Simulationen	28
2.9	Unterscheidung zwischen Open- und Closed-Loop-Tests	31
2.10	Open-Loop-Test für die Funktion ABS	31
2.11	Bewegungen eines Fahrzeugs	33
3.1	Aufbau des Kapitels	35
3.2	Aufbau einer Simulation	38
3.3	Simulationsmodul am Beispiel der Lenkung	39
3.4	Analyse der aktuellen vernetzten Funktionsentwicklung	44
3.5	Austausch eines XiL-SW-Elements mit Integrationsstufenmanagement	45
3.6	Modellbasierter Test	49
3.7	Zusammenfassung der Testphasen	53
3.8	V-Modell mit Testphasen	54
3.9	Workflow Testprozess	56
3.10	Gegenüberstellung von Kopplungsverfahren	61
3.11	Detaillierungsgrade von Modellen	64
3.12	Validierung vernetzter Module	68
3.13	Vorteil bei Verwendung der Werkzeuge	71
3.14	Use-Case-Diagramm TSK	73
3.15	Funktionsweise des TSKs	74
3.16	Modellverwalteroberfläche Testsystemkonfigurator	75
3.17	Testsystemkonfigurator	76
3.18	Input hinzufügen	77
3.19	Modellvernetzung im TSK	78
3.20	Beispielhafter Bremsdruckverlauf im TSK	81
3.21	Beispielhafter Lenkwinkelverlauf im TSK	82
3.22	Ablauf der automatisierten Prüfung	84
4.1	Simulationsaufbau für DSR-Tests	87
4.2	Verwendete Modelle für den Schnittstellentest am Beispiel der Lenkung	93
4.3	Modellbasierter Testfall des DSR-Zustands der Lenkung	94
4.4	Verwendete Modelle für den Variantentest	95

4.5	Lenkradwinkel mit verschiedenen Reibwerten	96
4.6	Gierrate mit verschiedenen Reibwerten	97
4.7	Lenkradwinkel bei verschiedenen Geschwindigkeiten	97
4.8	Bremsdruck bei verschiedenen Geschwindigkeiten	98
4.9	Verwendete Modelle für die Bauteilauslegung	99
4.10	μ -Split-Bremsung Radgeschwindigkeit vorne rechts	101
4.11	μ -Split-Bremsung Bremsdruck vorne links	101
4.12	μ -Split-Bremsung Bremsdruck vorne rechts	102
4.13	μ -Split-Bremsung Längsbeschleunigung	103
4.14	μ -Split-Bremsung Lenkradwinkel	104
4.15	Verwendete Modelle für die Vorapplikation	106
6.1	Testphasen ermöglichen schnellere Iterationsschleifen	115
7.1	Einsatz der Simulation im Entwicklungsprozess	117

Tabellenverzeichnis

2.1	Bussysteme im Automobilbereich	14
3.1	Streckenmodelle für Testphasen	67
3.2	Merkmale für die Signalgenerierung	80

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
ACORTA	Advanced Co-Simulation Methods for Real-Time-Applications
ACOSAR	Advanced Co-Simulation Open System Architecture
Adams	Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems
ADTF	Automotive Data and Time-Triggered Framework
AEV	Audi Electronic Venture GmbH
AUTOSAR	Automotive Open System Architecture
ASAM	Association for Standardization of Automation and Measuring Systems
BCM	Body Control Module
DDS	Data Distribution Service
DIS	Distributed Interactive Simulation
DSR	Driver Steering Recommendation
EPS	Electric Power Steering; Elektromechanische Servolenkung
ESC	Electronic Stability Control: Fahrdynamikregelung
FOH	First Order Hold: Kopplung erster Ordnung
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FMI	Functional Mockup Interface
FMU	Functional Mockup Unit
FTire	Flexible Structure Tire Model
GRAL	Graphing Library; eine freie Bibliothek zum Anzeigen von Plots in der Programmiersprache Java
HiL	Hardware-in-the-Loop
HLA	High Level Architecture
ICOS	Independent Co-Simulation
IS	Integrationsstufe
MAW	Modellanalysewerkzeug
MCDC	Modified Condition/ Decision Coverage
MiL	Model-in-the-Loop
MKS	Mehrkörpersystem