

# **Modellbasierte Methode für die automatisierte Testfallerstellung in der Automobilindustrie auf der Grundlage eines durchgängigen Systems Engineering Ansatzes**

Der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der RWTH Aachen University vorgelegte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften

von

**M. Sc.**  
**Matthias Markthaler**  
aus Fürstfeldbruck



# **Aachener Informatik-Berichte, Software Engineering**

herausgegeben von  
Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Rumpe  
Software Engineering  
RWTH Aachen University

Band 52

**Matthias Markthaler**  
RWTH Aachen University

## **Modellbasierte Methode für die automatisierte Testfallerstellung in der Automobilindustrie auf der Grundlage eines durchgängigen Systems Engineering Ansatzes**

Shaker Verlag  
Düren 2022

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8845-8

ISSN 1869-9170

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Eidesstattliche Erklärung

I, Matthias Markthaler

erklärt hiermit, dass diese Dissertation und die darin dargelegten Inhalte die eigenen sind und selbstständig, als Ergebnis der eigenen originären Forschung, generiert wurden.

Hiermit erkläre ich an Eides statt

1. Diese Arbeit wurde vollständig oder größtenteils in der Phase als Doktorand dieser Fakultät und Universität angefertigt;
2. Sofern irgendein Bestandteil dieser Dissertation zuvor für einen akademischen Abschluss oder eine andere Qualifikation an dieser oder einer anderen Institution verwendet wurde, wurde dies klar angezeigt;
3. Wenn immer andere eigene- oder Veröffentlichungen Dritter herangezogen wurden, wurden diese klar benannt;
4. Wenn aus anderen eigenen- oder Veröffentlichungen Dritter zitiert wurde, wurde stets die Quelle hierfür angegeben. Diese Dissertation ist vollständig meine eigene Arbeit, mit der Ausnahme solcher Zitate;
5. Alle wesentlichen Quellen von Unterstützung wurden benannt;
6. Wenn immer ein Teil dieser Dissertation auf der Zusammenarbeit mit anderen basiert, wurde von mir klar gekennzeichnet, was von anderen und was von mir selbst erarbeitet wurde;
7. Teile dieser Arbeit wurden zuvor veröffentlicht und zwar in:

[KMS<sup>+</sup>18] Stefan Kriebel, Matthias Markthaler, Karin Samira Salman, Timo Greifenberg, Steffen Hillemacher, Bernhard Rumpe, Christoph Schulze, Andreas Wortmann, Philipp Orth, and Johannes Richenhagen. Improving Model-based Testing in Automotive Software Engineering. In *International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE'18)*, pages 172–180. ACM, June 2018.

[DGH<sup>+</sup>18] Imke Drave, Timo Greifenberg, Steffen Hillemacher, Stefan Kriebel, Matthias Markthaler, Bernhard Rumpe, and Andreas Wortmann. Model-Based Testing of Software-Based System Functions. In *Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA'18)*, pages 146–153, August 2018.

[CMRP18] Mohamad Chamas, Matthias Markthaler, Bernhard Rumpe, and Kristin Paetzold. Bewertungsmethodik zur Verbesserung der Testfallerstellung auf

Basis von SysML. In *DFX 2018: 29th Symposium on Design for X*, pages 143–154, München, 2018.

- [DGH<sup>+</sup>19] Imke Drave, Timo Greifenberg, Steffen Hillemacher, Stefan Kriebel, Evgeny Kusmenko, Matthias Markthaler, Philipp Orth, Karin Samira Salman, Johannes Richenhagen, Bernhard Rumpe, Christoph Schulze, Michael Wenckstern, and Andreas Wortmann. *SMArDT modeling for automotive software testing. Software: Practice and Experience*, 0(49):301–328, 2019.
- [EJK<sup>+</sup>19] Rolf Ebert, Jahir Jolianis, Stefan Kriebel, Matthias Markthaler, Benjamin Pruenster, Bernhard Rumpe, and Karin Samira Salman. Applying Product Line Testing for the Electric Drive System. In Thorsten Berger, Philippe Collet, Laurence Duchien, Thomas Fogdal, Patrick Heymans, Timo Kehrer, Jabier Martinez, Raúl Mazo, Leticia Montalvillo, Camille Salinesi, Xhevahire Tërnavá, Thomas Thüm, and Tewfik Ziadi, editors, *International Systems and Software Product Line Conference (SPLC'19)*, pages 14–24. ACM, September 2019.
- Stefan Kriebel, Matthias Markthaler, Christian Granrath, Johannes Richenhagen, and Bernhard Rumpe. Modeling Hardware and Software Integration by an Advanced Digital Twin for Cyber-Physical Systems – Applied to the Automotive Domain. In *Handbook of Model-Based Systems Engineering*. Springer. ist derzeit zur Veröffentlichung akzeptiert und befindet sich in der Endkontrolle.

München, den 08.07.2022

Matthias Markthaler

## **Erklärung zur Wahrung von Betriebsgeheimnissen**

Matthias Markthaler

erklärt hiermit, dass diese Dissertation durch ihre Veröffentlichung keine bestehenden Betriebsgeheimnisse verletzt.

Hiermit versichere ich, dass die in Zusammenarbeit mit der *BMW Group (Petuelring 130, 80809 München)* entstandene Dissertationsschrift durch ihre Veröffentlichung keine bestehenden Betriebsgeheimnisse verletzt.

München, den 08.07.2022

Matthias Markthaler





# Kurzfassung

Die heutige und zukünftige Komplexität in großen Cyber-Physischen Systemen ist ohne systematische und digitalisierte Herangehensweisen kaum noch beherrschbar. Ein aktuelles Paradebeispiel solcher Cyber-Physischen Systeme sind die Produkte der Automobilindustrie, die einer noch nie da gewesenen Komplexität gegenüberstehen. Die Komplexität in der Automobilindustrie steigt stetig mit den Kundenansprüchen wie Individualität, Nachhaltigkeit, autonomes Fahren und Sicherheit bei hohen Qualitätsansprüchen zu günstigen Preisen. In der Informatik konnte in den letzten Jahrzehnten die Komplexität, Qualität und Effizienz mit agilen Methoden und einer durchgängigen Verwendung von Modellen verbessert werden. Während agile Methoden in der Automobilindustrie bereits ein fester Begriff ist, steht eine durchgängige Verwendung von Modellen in diesem Bereich noch aus. Auch wenn eine Reihe erfolversprechende modellbasierter Ansätze aufgesetzt wurden, konnte sich eine modellbasierte Entwicklung noch nicht vollständig etablieren.

Im Rahmen dieser Dissertation wird eine durchgängige Entwicklungsmethode unter Verwendung von Modellen in Verbindung mit einem kompatiblen Testfallgenerator in der Industrieanwendung vorgestellt. Die Methode ist eine Weiterentwicklung von der modellbasierten Spezifikationsmethode für Anforderungen, Design und Test und erlaubt eine modellgetriebene Entwicklung für die automatisierte Erstellung von Artefakten wie beispielsweise Testfälle.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eine modellgetriebene Spezifikationsmethode für Anforderungen, Design und Test in einer Automobilindustrie-Anwendung.
- Eine Statusanalyse des modellbasierten Testens in der Automobilindustrie.
- Kriterien für die Testbarkeit der spezifizierten Modelle und für den Nutzen der erstellten Testfälle.
- Eine domänenspezifische Sprache auf der Basis einer entwickelten MontiCore-Grammatik, die eine Maschinenlesbarkeit der Modelle gewährleistet.
- Ein Testfallgenerator, der diese domänenspezifischen abstrakten Modelle für die automatisierte Erstellung von Testfällen nutzt.
- Gewonnene aufgearbeitete Erkenntnisse aus der angewendeten Forschung in der Industrie.

Die Erkenntnisse aus der Anwendung der Methoden und der Tools in der Automobilindustrie dienen als Leitlinien für die Übertragung weiterer Kenntnisse aus der Informatik in die Praxis von traditionellen maschinenbau-geprägten Industrien. Die vorgestellte modellbasierte Spezifikationsmethode wurde fest in der Entwicklung von elektrischen Antrieben in einem Automobilkonzern verankert. Die Spezifikationsmodelle dienen den testfallerstellenden Personen als Basis zur manuellen und automatisierten Absicherung der Systeme und ermöglichen eine breite, tiefe und infolgedessen qualitativ hohe Absicherung.



# Abstract

The current and future interdisciplinary complexity in large cyber-physical systems can hardly be managed without systematic and digitized approaches. A popular example of cyber-physical systems are automobiles, which are facing unprecedented complexity. The complexity in automobiles is constantly increasing with its customer demands such as individuality, sustainability, autonomous driving and safety at high-quality standards at reasonable prices. In software engineering, complexity, quality, and efficiency have been improved over the last decades with agile methods and consistent use of models. While agile methods are already established in the automotive industry, the consistent use of models is still pending. Even though a number of promising model-based approaches have been set up, model-based development has not yet fully been established. This dissertation presents a consistent model-driven development method and a compatible test case generator. The method is a further development of the model-based Specification Method for Requirements, Design, and Test and allows model-driven development for the automated creation of artifacts such as test cases.

The main contributions of this thesis are:

- A model-driven Specification Method for Requirements, Design, and Test used in the automotive industry,
- A status analysis of model-based testing in the automotive industry,
- A criteria catalog for the testability of the specified models and the usability of created test cases,
- A domain-specific language based on a developed MontiCore grammar, which provides machine readability of models,
- A test case generator that creates automated test cases out of these domain-specific abstract models, and
- Lessons learned from the applied research in the industry.

The lessons learned serve as guidelines for the transfer of computer science methods to traditional mechanical engineering industries. The presented model-based specification method was firmly established in the electric drive development of a multinational automotive company. The specification models provide a basis for manual and automated testing and enable broad, deep, and high-quality safeguarding.



# Danksagung

Ich bedanke mich bei all denen, die mich während meiner Promotion begleitet, unterstützt, mir den nötigen Rückhalt gegeben oder für passende Ablenkungen gesorgt und dadurch zu dem Erfolg meiner Promotion beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Bernhard Rumpe für die Betreuung meiner Promotion, für die spannende und lehrreiche Zeit, für die konstruktiven Diskussionen und für die Möglichkeit im industriellen Umfeld promovieren zu können. Als Nächstes möchte ich Prof. Dr. Matthias Tichy für die Bereitschaft, das Zweitgutachten dieser Arbeit zu übernehmen, danken. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Prof. Dr. Erika Ábrahám für die Leitung meines Prüfungskomitees und Prof. Dr. Stefan Kowalewski für die Mitarbeit in diesem Komitee. Des Weiteren bedanke ich mich bei der BMW Group, der Exida GmbH und der FEV GmbH für die konstruktive Zusammenarbeit während der im Kontext dieser Arbeit durchgeführten Industriekooperationen. In dieser Hinsicht gilt mein Dank Dr. Michael Blum, Dr. Mohamad Chamas, Jörg Ebeling, Dr. Marc-Thomas Eisele, Arne Haas, Kevin Heinen, Jonas Karlsson, Dr. Stefan Kriebel, Thomas Lachner, Dr. Philipp Orth, Dr. Johannes Richenhagen, Karin Samira Salman, Dr. Georg Strobl, Dr. Björn Weigold und besonders Dr. Rolf Ebert für die Betreuung seitens der BMW Group.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei allen Kolleg\*innen, die mich während meiner Anwesenheit am Lehrstuhl und über die Distanz begleitet haben: Kai Adam, Vincent Bertram, Marita Breuer, Arvid Butting, Manuela Dalibor, Robert Eikermann, Sylvia Gunder, Arkadii Gerasimov, Robert Heim, Gabriele Heuschen, Dr. Katrin Hölldobler, Nico Jansen, Oliver Kautz, Jörg Christian Kirchhof, Dr. Evgeny Kusmenko, Achim Lindt, Dr. Markus Look, Dr. Judith Michael, Dr. Pedram Mir Seyed Nazari, Dr. Klaus Müller, Sonja Müßigbrodt, Lukas Netz, Dr. Dimitri Plotnikov, Deni Raco, Dr. Alexander Roth, David Schmalzing, Steffi Schrader, Igor Shumeiko, Sebastian Stüber, Simon Varga, Galina Volkova, Louis Wachtmeister, Dr. Michael von Wenckstern und Dr. Andreas Wortmann. Besonderer Dank gilt Imke Nachmann geb. Drave, Dr. Timo Greifenberg, Steffen Hillemacher und Dr. Christoph Schulze die mir durch ihren Einsatz diese Arbeit ermöglicht haben. Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen beteiligten Hiwis und Student\*innen, die die Entwicklung des Testfallgenerators unterstützt haben. Auch möchte ich mich bei den Kolleg\*innen und Freund\*innen bedanken, die immer ein offenes Ohr für mich hatten und mich mit Rat und Tat unterstützt haben.

Abschließend möchte ich ein besonders großes Danke an meine Eltern, Bettina und Mike, sowie meinem Bruder, Simon richten. Ihr wart immer für mich da und habt mich auf meinem gesamten Lebensweg stets unterstützt. Dadurch habt ihr es mir überhaupt erst möglich gemacht diesen Weg zu gehen. Ebenso möchte ich mich bei Simon für das Sichten und Kommentieren früher Fassungen dieser Arbeit bedanken. Schließlich möchte ich mich noch ganz besonders bei meiner Partnerin Christina bedanken. Sie hat mich stets unterstützt, mich motiviert und mir den Rücken freigehalten. Ich danke dir!

München, Juli 2022  
Matthias Markthaler



# **Disclaimer**

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der BMW Group.

The results, opinions, and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of the BMW Group.





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Beitrag . . . . .	3
1.1.1	Herausforderungen . . . . .	3
1.1.2	Methode . . . . .	4
1.1.3	Einordnung . . . . .	5
1.2	Aufbau der Arbeit . . . . .	6
1.3	Publikationen . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Modellbasierte (Software-) Entwicklung</b>	<b>9</b>
2.1	Grundlagen der modellbasierten Entwicklung . . . . .	9
2.2	Entwicklung in der Automobilindustrie . . . . .	12
2.2.1	Das V-Model . . . . .	14
2.2.2	ISO 26262 . . . . .	16
2.3	Verwendete Modellierungssprachen . . . . .	17
2.3.1	SysML-Aktivitätsdiagramm . . . . .	18
2.3.2	Domänenspezifische Sprachen mit dem MontiCore Framework . . . . .	20
2.4	Grundlagen der Spezifikationsmethode für Anforderungen, Design und Test (SMArDT) . . . . .	22
2.5	Modellbasierte Entwicklungsmethoden in der Automobilindustrie . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Absicherung in der Automobilindustrie</b>	<b>31</b>
3.1	Testobjekt und Testumgebung . . . . .	33
3.2	Testfallerstellung . . . . .	36
3.2.1	Schlüsselwortgetriebenes Testen . . . . .	38
3.2.2	Anforderungsbasierter Testfallstellungsprozess . . . . .	42
3.3	Ansätze für modellbasiertes Testen (MBT) in der Automobilindustrie . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Modellgetriebene Entwicklung mit SMArDT</b>	<b>49</b>
4.1	Hierarchische Dekomposition und Integration . . . . .	50
4.2	Funktionale Abstraktion der Funktion Anhalten . . . . .	55
4.2.1	Ebene A, die Betrachtungseinheit . . . . .	58
4.2.2	Ebene B, das funktionales Konzept . . . . .	60
4.2.3	Ebene C, die technische Lösung . . . . .	67
4.2.4	Ebene D, die Realisierung . . . . .	69
4.3	Hierarchische Dekomposition und funktionale Abstraktion . . . . .	70
4.4	MBT im Zusammenhang der Abstraktion und Dekomposition mit SMArDT . . . . .	78
4.5	Evolutionäre Entwicklungen mit SMArDT . . . . .	83

<b>5</b>	<b>Testmethodenanforderungen</b>	<b>87</b>
5.1	Kriterien für die Testbarkeit von Spezifikationsmodellen . . . . .	87
5.2	Statusanalyse - Wie wird traditionell im E-Antrieb getestet? . . . . .	92
5.2.1	Design und Durchführung der Studie . . . . .	94
5.2.2	Ergebnisse . . . . .	97
5.2.3	Fazit der Umfrage . . . . .	106
5.2.4	Validität der Studie . . . . .	108
5.3	Verwendungszweck und Erwartungen an die Testfälle . . . . .	109
5.3.1	Einsatz der Testfälle . . . . .	109
5.3.2	Eigenschaften der Testfälle . . . . .	110
5.4	Erwartungen an eine automatisiert modellbasierte Testfallerstellung . . . . .	114
<b>6</b>	<b>Aktivitätsdiagramme für SMArDT</b>	<b>117</b>
6.1	Herausforderungen einer Sprache für SMArDT . . . . .	118
6.1.1	Intuitive, disziplinenübergreifende Sprache . . . . .	118
6.1.2	Domänenspezifische Mehrzweck-Modelle . . . . .	120
6.1.3	Modellierung von Verhalten und Interaktionen . . . . .	120
6.1.4	Vereinbarkeit von Abstraktion und Detaillierung . . . . .	120
6.2	MontiCore-Grammatik für AD4S . . . . .	121
6.2.1	Grafische und textuelle Repräsentation von AD4S . . . . .	124
6.2.2	Kontextbedingungen von AD4S . . . . .	125
6.3	Modellierungsrichtlinien für Aktivitätsdiagramme . . . . .	128
<b>7</b>	<b>Realisierung des Testfallgenerators</b>	<b>131</b>
7.1	Testfallerstellung aus SysML-Aktivitätsdiagrammen . . . . .	132
7.1.1	SysML-Modell analysieren und transformieren . . . . .	133
7.1.2	Hierarchieauflösung . . . . .	135
7.1.3	Verzweigungsreduzierung . . . . .	136
7.1.4	Wertebereich-Vervollständigung ohne Schlüsselwortbibliothek . . . . .	138
7.1.5	Wertebereich-Vervollständigung mit Schlüsselwortbibliothek . . . . .	140
7.1.6	Konfigurationsmöglichkeiten . . . . .	145
7.1.7	Pfad-Kalkulation . . . . .	147
7.1.8	Pfad-Validierung . . . . .	149
7.1.9	Testfallerstellung . . . . .	149
7.2	Testfallerstellung aus SysML-Zustandsdiagrammen . . . . .	151
7.3	Erzeugte Artefakte des Testfallgenerators . . . . .	154
<b>8</b>	<b>Evaluation und gewonnene Erkenntnisse</b>	<b>157</b>
8.1	Ungebundenes vs. modellbasiertes Testen . . . . .	157
8.1.1	Erfahrungen aus dem Feld von testbaren Diagrammen . . . . .	160
8.1.2	Vergleich der Testfallerstellung aus natürlicher Sprache, mit manuellen und generierten modellbasierten Testfällen . . . . .	170
8.2	Auswirkungen der Modellierungsrichtlinien auf die Modellierung . . . . .	174
8.2.1	Studiendesign und Forschungsfrage . . . . .	175

8.2.2	Interview . . . . .	177
8.2.3	Validität der Ergebnisse des Interviews . . . . .	184
8.2.4	Fazit der Umfrage . . . . .	185
8.3	Gewonnene Erkenntnisse aus der Einführung von MBT in der Industrie .	186
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>191</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>197</b>
<b>A</b>	<b>Abkürzungen</b>	<b>241</b>
<b>B</b>	<b>Glossar</b>	<b>243</b>
<b>C</b>	<b>Curriculum Vitae</b>	<b>251</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>265</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>269</b>