

Automotive Software

Prozesse, Modelle und Variabilität

Von der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Informatiker
Cem Mengi

aus Aachen

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Dr. h.c. Manfred Nagl
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Stefan Kowalewski

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Juni 2012

Aachener Informatik-Berichte, Software Engineering

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

Band 13

Cem Mengi

Automotive Software

Prozesse, Modelle und Variabilität

Shaker Verlag
Aachen 2012

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, 2012)

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1262-0

ISSN 1869-9170

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Software hat in der Automobilentwicklung eine bedeutende Rolle eingenommen. Sie eröffnet neue Potenziale und ist primärer Innovationstreiber. Gleichzeitig ist Software aber auch ein erheblicher Komplexitäts- und Kostenfaktor. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die unzureichende Anwendung geeigneter Methoden und Konzepte zur systematischen Erfassung und Beherrschung von Softwarevarianten im Sinne der Wiederverwendung.

Das Bestreben, Software so zu gestalten, dass es für verschiedene Varianten adaptierbar ist, erfordert geeignete Maßnahmen in allen Phasen des Softwareentwicklungsprozesses: (1) Variabilität muss explizit erfasst werden können, (2) Abhängigkeiten zwischen variablen Entitäten müssen formuliert werden können und (3) Varianten müssen gebunden werden können. Die vorliegende Arbeit schlägt in diesem Zusammenhang verschiedene Lösungskonzepte vor und wendet diese auf drei Entwicklungsebenen an.

Die Basis stellt hierbei ein *Variabilitätsmodell* dar, welches jegliche Form der *Variabilität explizit modelliert* und *strukturiert*. *Abhängigkeiten* werden durch eine *Restriktionssprache* formuliert. Schließlich werden Varianten durch einen *Konfigurierungsvorgang* und einer anschließenden *Generierung* gebunden. Dieses Variabilitätsmodell wird dann auf allen Entwicklungsebenen eingesetzt.

Für den *konzeptionellen Entwurf mit Funktionsnetzen* wird ein *Top-Down-Modellierungsprozess* vorgeschlagen. Wiederverwendbare Bestandteile werden hierbei zunächst in einer *klassifizierten Domänenbibliothek* modelliert. Diese können dann aus der Bibliothek instanziiert und zur Modellierung von Funktionsnetzen verwendet werden. Zur expliziten und formalen Erfassung von Varianten wird ein *Variabilitätsmechanismus* eingeführt. Dieser wird mit dem Variabilitätsmodell gekoppelt, sodass Funktionsvarianten vollständig beherrscht werden können.

Im *Architekturentwurf mit Simulink-Modellen* wird aufgrund der hierbei etablierten *inkrementellen Variantenentwicklung durch Copy-Paste* ein Bottom-Up-Ansatz verfolgt, um gemeinsame und variable Modellanteile explizit zu identifizieren. Durch die *Anwendung von geeigneten Variabilitätsmechanismen* werden die Modellvarianten in ein Familienmodell überführt. Eine Anbindung an das Variabilitätsmodell komplettiert den Ansatz dieser Phase.

Bei der *Implementierung (mit der Programmiersprache C)* wird ein Ansatz verfolgt, bei dem die *überwachte Variantenimplementierung* mit Anbindung an das Variabilitätsmodell das zentrale Konzept dieser Ebene darstellt. Modifikationen am Quellcode werden an *variantenspezifischen Sichten* durchgeführt und anhand von *Variabilitätsmechanismen* in den ursprünglichen Quellcode überführt.

Die Ansätze der verschiedenen Ebenen sind dadurch charakterisiert, dass sie sowohl auf allen anderen Entwicklungsebenen als auch in Kombination angewendet werden können. Aus den beschriebenen Lösungskonzepten sind eine Reihe *prototypischer Werkzeuge* entstanden. Sie zeigen den Nachweis der Machbarkeit der in dieser Arbeit beschriebenen Ansätze.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei den lieben Menschen bedanken, die mich in der Zeit meiner Promotion unterstützt haben.

Mein erster und ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Manfred Nagl. Wie es der Zufall so wollte, habe ich zwar spät aber dennoch rechtzeitig den Weg zum Lehrstuhl für Informatik 3 unter seiner Leitung gefunden. Seine prospektiven Sichtweisen und die intensiven Diskussionen haben zum Gelingen dieser Arbeit wesentlich beigetragen.

Herrn Prof. Stefan Kowalewski danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens. Herrn Prof. Matthias Jarke und Herrn Prof. Berthold Vöcking danke ich für die Bereitschaft als weitere Prüfer. Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Bernhard Rumpe für seine Unterstützung danken.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen bedanken, die ihm Rahmen von studentischen Arbeiten das Automotive-Thema dieser Arbeit vorangetrieben haben. Hierzu gehören Ruben Zimmermann, Antonio Navarro Pérez, Önder Babur, Maxim Pogrebinski, Onur Armaç, Özgür Akcasoy, Youssef Arbach und Jan Pojer. Außerhalb der Uni hatte ich auch Gelegenheiten, andere Talente dieser Gruppe kennenzulernen. Önder Babur ist besonders musikalisch begabt. Seine regelmäßigen Auftritte in Cafés habe ich versucht, nie zu verpassen. Mit Onur Armaç verbindet uns etwas ganz besonderes. Wir sind beide Fans von Galatasaray Istanbul. Gemeinsam haben wir bei vielen Spielen mitgefiebert. Von unserem Rotschopf Youssef Arbach konnte ich viel über die Herkunft von Begriffen aus dem arabischen Raum lernen. Schließlich hat Jan Pojer mir gezeigt, warum die Tschechen die besten Biertrinker der Welt sind.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Kollegen am Lehrstuhl bedanken. Ganz besonders bei Ibrahim Armaç. Er hat mich nicht nur zur Promotion motiviert, sondern stand zu jeder Zeit mit Rat und Tat an meiner Seite. Es war schön, ihn stets als Vorbild am Lehrstuhl zu haben. Thomas Heer war ein liebenswürdiger Büronachbar, mit dem man sich auch außerhalb der Arbeitszeiten sehr schön unterhalten konnte. Ein besonderes Talent, Menschen zum Lachen zu bringen, hatte René Wörzberger. Dank ihm waren insbesondere unsere Weihnachtsfeiern sehr unterhaltsam. Erhard Weinell danke ich für seine Hilfsbereitschaft. Die Ansichten und Ratschläge von Daniel Retkowitz waren für mich immer sehr hilfreich. Theresa Körtgen hat durch die regelmäßigen Sportaktivitäten dafür gesorgt, dass wir nicht am Lehrstuhl einrosten. Gegen die Endphase meiner Promotion hatte ich das Glück, mit Rim Jnidi ein Büro zu teilen. Unsere Unterhaltungen waren immer sehr amüsant. Vielen Dank für die schöne Zeit Rim. Urlaubserfahrungen und -wünsche konnte ich immer am besten mit Marita Breuer teilen. Dir auch einen herzlichen Dank für die Inspirationen. Simon Becker, Thomas Haase, Markus Heller, Bodo Kraft, Ulrike Ranger, Christian Fuß, Christof Mosler, Galina Volkova, Arne Haber, Christoph Herrmann, Thomas Kurpick, Markus Look, Antonio Navarro Pérez, Claas Pinkernell, Holger Rendel, Jan Oliver Ringert und Ingo Weisemöller danke ich für ihre fachliche und organisatorische Unterstützung. Schließlich gilt mein Dank unseren Sekretärinnen Angelika Fleck, Silke Cormann und Sylvia Gunder. Sie waren immer eine großartige Unterstützung

bei sämtlichen organisatorischen Aspekten.

In meiner Freizeit haben meine Freunde dafür gesorgt, den nötigen Abstand von der Arbeit zu bekommen. Ein ganz besonderer Dank gilt Nur und Murad Abu-Tair. Unsere „Spaziergang“- und „Frische Luft“-Expertin war immer Nur. Ihr Ehemann Murad hingegen war auf Autos, Smartphones, Comedy und Burger spezialisiert. Gemeinsam waren sie ein unverzichtbares Duo für viele entspannende Momente. Ebru Armaç hat mit ihren spannenden Geschichten stets für unterhaltsame Abende gesorgt. Gemeinsam mit ihrem Ehemann Ibrahim Armaç waren sie ganz besondere Freunde, die mir immer unterstützend zur Seite standen. Auch die gemeinsamen Wochenendtrips haben immer sehr viel Spaß gemacht und werden hoffentlich in Zukunft fortgeführt. Mit Ismet Aktaş sind wir wie Pech und Schwefel. Seit nun zwölf Jahren schlage ich mit ihm denselben Weg ein. Unsere Gespräche während des Mittagessens oder bei einer Kaffeepause habe ich immer sehr genossen. Aber auch unsere abendlichen Aktivitäten waren immer spaßig. Des Weiteren möchte ich mich bei Gabriella und Giorgio Guarrasi, Vildan und Halil Gülez, Nina und Farzad Afschari, Yasemin und Murat Başaran, Sinem Kuz (vielen Dank für die vielen Korrekturvorschläge), Canan Biçer (meine Kindergarten-, Schul- und Unifreundin) und Canan Kasaci für die tolle Zeit bedanken.

Schließlich gilt mein unendlicher Dank meiner Familie. Meine Eltern, Nezaket und Sefer Mengi, haben mir in jeder Lebenssituation den Rücken gestärkt, mich aufgemuntert und unterstützt. Ohne sie wäre ich wohl heute nicht da, wo ich jetzt bin. Ich hoffe, dass ich ihnen mit dieser Arbeit etwas zurückgeben konnte. *Sevgili anneciğim, sevgili babacığim. Sevginiz ve desteğiniz için sonsuz teşekkürler. İyi varsiniz. Sizi çok seviyorum.* Meiner Schwester Aynur und ihrem Ehemann Mustafa Savaşan danke ich für die besonderen gemeinsamen Grillabende. *Ablacığım sen bitanesin (Sende tabiki enişte).* Auch meinen beiden Neffen Cenk und Devin Savaşan danke ich, dass sie mich stets zum Lachen bringen. Meinem Bruder Zafer und seiner Ehefrau Sevgi Mengi danke ich für ihre unerschöpfliche Unterstützung. Ihren beiden Söhnen Enis und Mirkan Mengi danke ich dafür, dass sie mich durch ihre vielen Hausaufgabenfragen zurück in die Schulzeit katapultiert haben. Meinem Bruder Muzaffer und seiner Ehefrau Gülden Mengi danke ich für die lustigen Unterhaltungen, die teilweise in Lachkrämpfen endeten. Meinen beiden Nichten Eysel und Minel Mengi danke ich, dass sie mir zeigen, wie schön es ist, klein zu sein. Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Bruder Alper Mengi, der immer für mich da ist und, wenn nötig, auch Berge für mich versetzen würde. Ein besonderer Dank gebührt auch meinen Schwiegereltern Birgül und Cahit Pişkin, die mich stets unterstützt haben. Ich bin froh euch alle zu haben. Zum Schluss möchte ich mich bei einem ganz wundervollen Menschen an meiner Seite bedanken: meiner Ehefrau Azime. Die vielen gemeinsamen Jahre haben uns zu einem eingespielten Team zusammengeschweißt. Sie ist meine Stütze, auf die ich immer zählen kann. Sie hat mir gezeigt, dass es nichts gibt, das man nicht überwinden kann. Dafür danke ich Dir vom ganzen Herzen mein Engel.

Aachen, Juli 2012
Cem Mengi

Inhaltsverzeichnis

I	Einleitung	1
1	Motivation	3
1.1	Problemstellung	6
1.2	Lösungsansatz	8
1.3	Wissenschaftliche Beiträge	10
1.4	Struktur der Arbeit	13
2	Ein Beispielszenario	15
2.1	Das Fahrzeug: BMW X5 xDrive50i	17
2.2	Das elektronische System	17
2.3	Die Funktionen	19
2.3.1	Die Zentralverriegelung	23
2.3.2	Der Komfortzugang	26
2.3.3	Die Innenbeleuchtung	27
2.3.4	Die Außenbeleuchtung	28
2.3.5	Die elektronische Wegfahrsperre	28
2.4	Das Szenario	29
2.5	Zusammenfassung	30
II	Prozesse, Variabilität und Variabilitätsmodell	33
3	Der Referenzprozess	35
3.1	Featureebene	35
3.2	Funktionsebene	37
3.3	Architekturebene	37
3.4	Codeebene	38
3.5	Zusammenfassung	38
4	Variabilität: Modellierung und Bindung	39
4.1	Einleitung und Motivation	39
4.1.1	Terminologie	46
4.1.2	Herausforderungen und Anforderungen	51
4.2	Modellierung	65
4.2.1	Variabilitätsmodell	65
4.2.2	Restriktionsmodell	73
4.3	Bindung	86

4.3.1	Konfigurationsmodell	87
4.3.2	Generierungsmodell	97
4.4	Realisierung	114
4.4.1	Variabilitätsmodell	115
4.4.2	Restriktionsmodell	115
4.4.3	Konfigurationsmodell	121
4.4.4	Generierungsmodell	125
4.5	Verwandte Arbeiten	128
4.5.1	Featuremodelle nach der FODA-Methode	130
4.5.2	FeatuRSEB	132
4.5.3	Kardinalitätsbasierte Featuremodelle	134
4.5.4	Variability Specification Language	136
4.5.5	Orthogonale Variabilitätsmodelle	139
4.5.6	COVAMOF	141
4.5.7	CONSUL und pure::variants	145
4.5.8	Vergleich	147
4.6	Zusammenfassung	150

III Modelle und Variabilität im Referenzprozess 153

5 Funktionsebene 155

5.1	Einleitung und Motivation	155
5.2	Funktionsnetzmodellierung	163
5.2.1	Metamodell	163
5.2.2	Grafische Notation	164
5.3	Domänenmodellierung	165
5.3.1	Abstraktionsregeln	165
5.3.2	Abstraktionsebenen	179
5.4	Variabilitätsmodellierung	183
5.4.1	Variabilitätsmechanismus	183
5.4.2	Variabilitätsmodell	185
5.5	Realisierung	189
5.5.1	Domänenmodell	189
5.5.2	Funktionsnetz	191
5.5.3	Integration aller Modelle	193
5.6	Verwandte Arbeiten	195
5.6.1	Funktionsnetze mit UML-RT	196
5.6.2	MOSES	197
5.6.3	AutoMoDe	199
5.6.4	VEIA	201
5.6.5	Vergleich	203
5.7	Zusammenfassung	205

6 Architekturebene 207

6.1	Einleitung und Motivation	207
6.1.1	Herausforderungen und Anforderungen	209
6.1.2	Lösungsskizze	213
6.1.3	Struktur des Kapitels	217
6.2	Metamodellierung	217
6.2.1	Simulink-Metamodell	217
6.2.2	Kommunalitätsmetamodell	221
6.2.3	Differenzmetamodell	230
6.3	Differenzierung	236
6.3.1	Import	236
6.3.2	Festlegung von Vergleichspaaren	236
6.3.3	Differenzierungsalgorithmus	239
6.3.4	Export	243
6.4	Variabilitätsmodellierung	244
6.4.1	Variabilitätsmechanismen	245
6.4.2	Bewertung der Variabilitätsmechanismen	253
6.4.3	Restrukturierung mit Model Variants und Variant Subsystem	255
6.4.4	Variabilitätsmodell	266
6.5	Anwendungsbeispiel: Fahrzeugzugangssystem	266
6.6	Realisierung	276
6.6.1	Metamodelle	276
6.6.2	Interaktionen mit Matlab Simulink	276
6.6.3	Differenzierungsalgorithmus	280
6.7	Verwandte Arbeiten	282
6.7.1	CloneDetective	283
6.7.2	Automatische Identifikation von Varianten und Variationspunkten	284
6.7.3	Modellierung und Konfiguration von Funktionsvarianten	286
6.7.4	Vergleich	287
6.8	Zusammenfassung	289
7	Codeebene	291
7.1	Einleitung und Motivation	291
7.2	Variabilitätsmodellierung	295
7.2.1	Variabilitätsmechanismen	295
7.2.2	Variabilitätsmodell	298
7.3	Variantengetriebene Implementierung	298
7.3.1	Konfigurierung	298
7.3.2	Erzeugung von Sichten	298
7.3.3	Überwachte Implementierung	299
7.3.4	Transformierung	299
7.4	Anwendungsbeispiel: Fahrzeugzugangssystem	308
7.5	Realisierung	313
7.5.1	Context Provider	315
7.5.2	Model Provider	315
7.5.3	ModelController	316

7.5.4	View	317
7.5.5	Recording Controller	318
7.5.6	Folding Provider	319
7.6	Verwandte Arbeiten	319
7.6.1	Program Slicing	320
7.6.2	Feature Exploration and Analysis Tool (FEAT)	321
7.6.3	Spotlight	322
7.6.4	Mylar und Mylyn	322
7.6.5	Colored Integrated Development Environment (CIDE)	324
7.6.6	Vergleich	325
7.7	Zusammenfassung	327
IV Epilog		329
8	Schlussbemerkungen	331
8.1	Zusammenfassung	331
8.2	Ausblick	333
Literaturverzeichnis		335
Abkürzungsverzeichnis		351