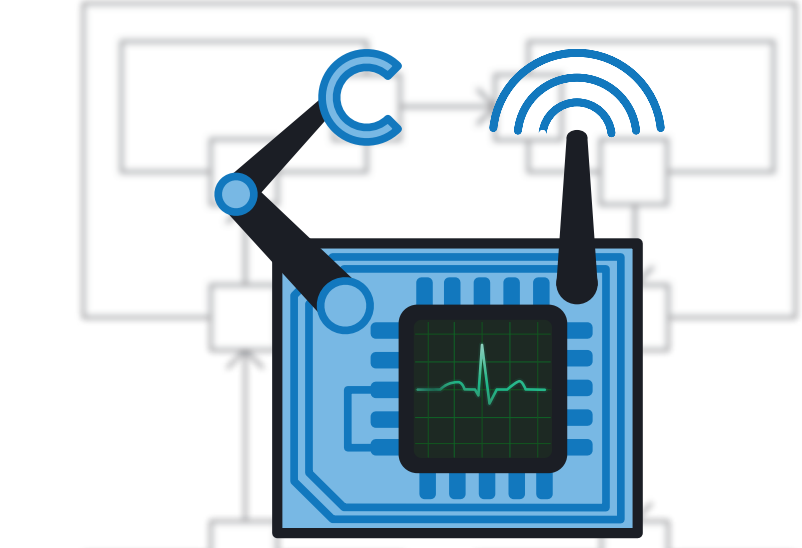
SE | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Jörg Christian Kirchhof

Model-Driven Development, Deployment, and Analysis of Internet of Things Applications



MontiThings

Aachener Informatik-Berichte,
Software Engineering

Band 54

Hrsg: Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Rumpe

Model-Driven Development, Deployment, and Analysis of Internet of Things Applications

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

vorgelegt von

M.Sc. RWTH
Jörg Christian Kirchhof
aus Hilden, Deutschland

Berichter: Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Bernhard Rumpe
Universitätsprofessor Mag. Dr. Manuel Wimmer

Tag der mündlichen Prüfung: 11. November 2022

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

Aachener Informatik-Berichte, Software Engineering

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

Band 54

Jörg Christian Kirchhof
RWTH Aachen University

Model-Driven Development, Deployment, and Analysis of Internet of Things Applications

Shaker Verlag
Düren 2023

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

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

Copyright Shaker Verlag 2023
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8960-8
ISSN 1869-9170

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Eidesstattliche Erklärung

I, Jörg Christian Kirchhof 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. Ein Teil oder Teile dieser Arbeit wurden zuvor veröffentlicht und zwar in:

   [BKK+22] Arvid Butting, Jörg Christian Kirchhof, Anno Kleiss, Judith Michael, Radoslav Orlov, and Bernhard Rumpe. Model-Driven IoT App Stores: Deploying Customizable Software Products to Heterogeneous Devices. In *Proceedings of the 21th ACM SIGPLAN International Conference on Generative Programming: Concepts and Experiences (GPCE 22)*, pages 108–121. ACM, December 2022

   [KKR+22a] Jörg Christian Kirchhof, Anno Kleiss, Bernhard Rumpe, David Schmalzing, Philipp Schneider, and Andreas Wortmann. Model-driven Self-adaptive Deployment of Internet of Things Applications with Automated Modification Proposals. ACM Transactions on Internet of Things, 3(4), 2022

   [KKR+22b] Jörg Christian Kirchhof, Evgeny Kusmenko, Jonas Ritz, Bernhard Rumpe, Armin Moin, Atta Badii, Stephan Günnemann, and Moharram Challenger. MDE for Machine Learning-Enabled Software Systems: A Case Study and Comparison of MontiAnna & ML-Quadrat.

In *Proceedings of the 25th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems: Companion Proceedings*, MODELS '22, page 380–387, New York, NY, USA, October 2022. ACM.

[KMM+22] Jörg Christian Kirchhof, Lukas Malcher, Judith Michael, Bernhard Rumpe, and Andreas Wortmann. Web-Based Tracing for Model-Driven Applications. In *Proceedings of the 48th Euromicro Conference Series on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA'22)*. In Press, 2022

[KKM+22] Jörg Christian Kirchhof, Anno Kleiss, Judith Michael, Bernhard Rumpe, and Andreas Wortmann. Efficiently Engineering IoT Architecture Languages—An Experience Report (Poster). STAF 2022 Workshop Proceedings: 10th International Workshop on Bidirectional Transformations (BX 2022), 2nd International Workshop on Foundations and Practice of Visual Modeling (FPVM 2022) and 2nd International Workshop on MDE for Smart IoT Systems (MeSS 2022) (co-located with Software Technologies: Applications and Foundations federation of conferences (STAF 2022)), July 2022

[HKK+22] Mattis Hoppe, Jörg Christian Kirchhof, Evgeny Kusmenko, Chan Yong Lee, and Bernhard Rumpe. Agent-Based Autonomous Vehicle Simulation with Hardware Emulation in the Loop. In *2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 16–21, 2022

[KRSW22] Jörg Christian Kirchhof, Bernhard Rumpe, David Schmalzing, and Andreas Wortmann. MontiThings: Model-driven Development and Deployment of Reliable IoT Applications. *Journal of Systems and Software*, 183:111087, January 2022

[KMR21] Jörg Christian Kirchhof, Lukas Malcher, and Bernhard Rumpe. Understanding and Improving Model-Driven IoT Systems through Accompanying Digital Twins. In Eli Tilevich and Coen De Roover, editors, *Proceedings of the 20th ACM SIGPLAN International Conference on Generative Programming: Concepts and Experiences (GPCE '21)*, pages 197–209. ACM SIGPLAN, October 2021

[AKKR21] Abdallah Atouani, Jörg Christian Kirchhof, Evgeny Kusmenko, and Bernhard Rumpe. Artifact and Reference Models for Generative Machine Learning Frameworks and Build Systems. In Eli Tilevich and Coen De Roover, editors, Proceedings of the *20th ACM SIGPLAN International Conference on Generative Programming: Concepts and Experiences (GPCE '21)*, pages 55–68. ACM SIGPLAN, October 2021

[KNS+21] Jörg Christian Kirchhof, Michael Nieke, Ina Schaefer, David Schmalzing, and Michael Schulze. *Variant and Product Line Co-Evolution*, pages 333–351. Springer, January 2021

[KMR+20b] Jörg Christian Kirchhof, Judith Michael, Bernhard Rumpe, Simon Varga, and Andreas Wortmann. Model-driven Digital Twin Construction: Synthesizing the Integration of Cyber-Physical Systems with Their Information Systems. In *Proceedings of the 23rd ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems*, pages 90–101. ACM, October 2020

[KSGW20] Jörg Christian Kirchhof, Martin Serror, René Glebke, and Klaus Wehrle. Improving MAC Protocols for Wireless Industrial Networks via Packet Prioritization and Cooperation. In *Proceedings of the 21st International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). Workshop CCNCPS.*, pages 367–372. IEEE, August 2020

[KMR20a] Jörg Christian Kirchhof, Judith Michael, and Bernhard Rumpe. *Softwarequalität in Energieprojekten*, pages 273–279. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, July 2020

[KRSW20] Jörg Christian Kirchhof, Bernhard Rumpe, David Schmalzing, and Andreas Wortmann. Structurally Evolving Component-Port-Connector Architectures of Centrally Controlled Systems. In Maxime Cordy, Mathieu Acher, Danilo Beuche, and Gunter Saake, editors, *International Working Conference on Variability Modelling of Software-Intensive Systems.* ACM, February 2020

[KKRZ19] Jörg Christian Kirchhof, Evgeny Kusmenko, Bernhard Rumpe, and Hengwen Zhang. Simulation as a Service for Cooperative Vehicles. In Loli Burgueño, Alexander Pretschner, Sebastian Voss, Michel Chaudron, Jörg Kienzle, Markus Völter, Sébastien Gérard, Mansooreh Zahedi, Erwan Bousse, Arend Rensink, Fiona Polack, Gregor Engels, and Gerti Kappel, editors, *Proceedings of MODELS 2019. Workshop MASE*, pages 28–37. IEEE, September 2019

[KKMR19] Jörg Christian Kirchhof, Evgeny Kusmenko, Jean Meurice, and Bernhard Rumpe. Simulation of Model Execution for Embedded Systems. In Loli Burgueño, Alexander Pretschner, Sebastian Voss, Michel Chaudron, Jörg Kienzle, Markus Völter, Sébastien Gérard, Mansooreh Zahedi, Erwan Bousse, Arend Rensink, Fiona Polack, Gregor Engels, and Gerti Kappel, editors, *Proceedings of MODELS 2019. Workshop MLE*, pages 331–338. IEEE, September 2019

[SKS+17] Martin Serror, Jörg Christian Kirchhof, Mirko Stoffers, Klaus Wehrle, and James Gross. Code-Transparent Discrete Event Simulation for Time-Accurate Wireless Prototyping. In *Proceedings of the 2017 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*, SIGSIM-PADS '17, pages 161–172, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery

Aachen, 11. Januar 2023

Jörg Christian Kirchhof

Abstract

The Internet of Things (IoT) describes the idea of connecting objects equipped with sensors and actuators to each other and to the Internet. IoT applications are complex to develop for a variety of reasons, including the heterogeneity of the IoT devices, diverse software stacks, the fact that IoT applications are usually distributed applications, and the fragility of the hardware and network connection. Model-driven methods promise to make the complex development of IoT applications manageable by raising the level of abstraction. Related work has proposed a variety of component and connector (C&C) architecture description languages (ADLs) for developing IoT applications. However, these mainly focus on the early development phases and largely neglect reliability aspects.

Accordingly, this work focuses on the model-driven engineering of IoT applications throughout their lifecycle. We present *MontiThings*, an ecosystem for model-driven IoT applications. Based on existing approaches, the MontiThings ecosystem specifies an IoT-focused C&C ADL using the MontiCore language workbench. MontiThings aims at offering an ecosystem that covers the lifecycle of IoT applications starting from the first architecture concepts up to the eventual deployment of the application and its analysis during runtime. At all stages of this process, MontiThings offers reliability mechanisms that can help developers to specify resilient applications.

For design activities, MontiThings provides a C&C language integrated with international system of units (SI) units and the object constraint language (OCL) usable to detect exceptional situations at operating time. Furthermore, MontiThings offers an integration method for hardware drivers that provides a clear separation of concerns and, thus, enables components to be reused and tested independently of their hardware integration. A generator translates the C&C architecture models to C++ code. Based on a tagging language, the IoT components can be integrated with synthesized digital twins. When deploying applications, MontiThings' requirements-based deployment method is able to not only calculate a distribution of components to IoT devices but can also actively propose changes to the user should their requirements be unfulfillable. If devices fail at runtime, MontiThings can automatically adapt the deployment to the changed situation (if possible within the requirements) and restore the previous software state of failed devices. To understand unforeseen situations that may arise at runtime, MontiThings provides developers with model-driven analysis services. Overall, MontiThings demonstrates an end-to-end model-driven approach for designing IoT applications.

Kurzfassung

Das Internet der Dinge (IoT) beschreibt die Idee, mit Sensoren und Aktuatoren ausgestattete Gegenstände untereinander und mit dem Internet zu verbinden. Die Entwicklung von IoT-Anwendungen ist aus verschiedenen Gründen komplex. Dazu gehören die Heterogenität der IoT-Geräte, die Tatsache, dass es sich bei IoT-Anwendungen normalerweise um verteilte Anwendungen handelt, und die Fehleranfälligkeit der Hardware und der Netzwerkverbindung. Modellgetriebene Methoden versprechen, die komplexe Entwicklung von IoT-Anwendungen durch die Anhebung des Abstraktionsniveaus handhabbar zu machen. In verwandten Arbeiten wurde eine Vielzahl von Komponenten-und-Konnektor (C&C) Architekturbeschreibungssprachen (ADLs) zur Entwicklung von IoT-Anwendungen vorgestellt. Diese konzentrieren sich jedoch hauptsächlich auf die frühen Entwicklungsphasen und vernachlässigen weitgehend Zuverlässigkeitsaspekte.

Dementsprechend konzentriert sich diese Arbeit auf die modellgetriebene Entwicklung von IoT-Anwendungen über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg. Wir stellen *MontiThings* vor, ein Ökosystem zur modellgetriebenen Entwicklung von IoT-Anwendungen. Basierend auf bestehenden Ansätzen spezifiziert das MontiThings-Ökosystem eine IoT-fokussierte C&C ADL unter Verwendung der MontiCore Language Workbench. MontiThings zielt darauf ab, ein Ökosystem anzubieten, das den Lebenszyklus von IoT-Anwendungen abdeckt, angefangen bei den ersten Architekturkonzepten bis hin zur Bereitstellung der Anwendung und der Analyse der Anwendung während der Laufzeit. In allen Phasen dieses Prozesses bietet MontiThings dabei Zuverlässigkeitsmechanismen, die den Entwicklern helfen können, robuste Anwendungen zu spezifizieren.

Für Designaktivitäten bietet MontiThings eine C&C-Sprache, die das internationale Einheitensystem (SI) und die Object Constraint Language (OCL) integriert, um Ausnahmesituationen zur Laufzeit zu erkennen. Außerdem bietet MontiThings eine Integrationsmethode für Hardwaretreiber, die eine klare Trennung von Zuständigkeiten und somit die Wiederverwendung und das Testen von Komponenten unabhängig von ihrer Hardwareintegration ermöglicht. Ein Generator übersetzt die C&C-Architekturmodelle in C++-Code. Basierend auf einer Tagging-Sprache können die IoT-Komponenten mit synthetisierten digitalen Zwillingen integriert werden. Beim Deployment von Anwendungen ist die anforderungsbasierte Deployment-Methode von MontiThings in der Lage, nicht nur eine Verteilung der Komponenten auf die IoT-Geräte zu berechnen, sondern dem Nutzer auch aktiv Änderungen vorzuschlagen, sollten seine Anforderungen nicht erfüllbar sein. Fallen Geräte zur Laufzeit aus, kann MontiThings das Deployment automatisch an die geänderte Situation anpassen (sofern es im Rahmen der Anforderungen möglich ist) und den vorherigen Softwarestand der ausgefallenen Geräte wiederherstellen. Zum Verständnis unvorhergesehener Situationen zur Laufzeit stellt MontiThings Entwicklern modellgestriebene Analysedienste zur Verfügung. Insgesamt demonstriert MontiThings eine durchgängig modellgetriebene Methode zur Entwicklung von IoT-Anwendungen.

Danksagung

Viele Menschen haben mich auf dem Weg zu meiner Promotion begleitet bei denen ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

An erster Stelle möchte ich mich gerne bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Bernhard Rumpe bedanken. Zum einen bedanke ich mich für die konstruktiven wissenschaftlichen Diskussionen, durch die ich stets nochmal einen anderen Blickwinkel auf die Dinge erhalten habe, und zum anderen auch für die Möglichkeit mich in den Projekten mit Ford weiterzuentwickeln. Insbesondere bin ich dankbar für die Freiheit, immer an den Themen arbeiten zu dürfen, die mich am meisten interessieren.

Ich danke Prof. Mag. Dr. Manuel Wimmer für die Zweitbegutachtung dieser Arbeit. Darüber hinaus möchte ich mich bei Prof. Dr. Erika Ábrahám für die Bereitschaft bedanken, meine theoretische mündliche Prüfung abzunehmen, sowie bei Prof. Dr.-Ing. Stefan Kowalewski für die Übernahme des Vorsitzes meiner Prüfungskommission.

Insbesondere möchte ich mich auch bei den zahlreichen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Software Engineering für erfolgreiche und angenehme Zusammenarbeit bedanken. Durch euch wurde die Zeit meiner Promotion zu einer schönen Zeit, die mir auf ewig in Erinnerung bleiben wird. Ich danke Jun.-Prof. Dr. Andreas Wortmann, Dr. Evgeny Kusmenko und Dr. Judith Michael dafür, dass sie mir über die Jahre hinweg immer Mentoren waren und mich in allen Fragen des akademischen Arbeitens beraten haben. Ich danke David Schmalzing für die angenehme Büropartnerschaft und für die Pflege und Weiterentwicklung von MontiArc ohne das diese Arbeit nicht so möglich gewesen wäre. Simon Varga und Robert Eikermann danke ich dafür, dass sie mich als IT Admin aufgenommen haben. Insbesondere danke ich Simon Varga auch für die tolle Zusammenarbeit bei MontiGem und für die tollen Gespräche, wenn wir abends mal wieder als einige der letzten im Büro waren. Ich danke Arkadii Gerasimov, Lukas Netz, Galina Volkova und Kai Adam für die Hilfe bei der Benutzung von MontiGem. Bei Dr. Arvid Butting, Nico Jansen und Niklas Dienstknecht möchte ich mich für die Hilfe bei den MontiCore Versionsumzügen bedanken. Mein besonderer Dank gilt Sylvia Gunder und Sonja Müßigbrodt dafür, dass sie mich über die Jahre stets in allen organisatorischen Fragen unterstützt haben und jede noch so unüberwindbar scheinende administrative Hürde zu meistern wussten und dafür, dass sie mir bei der Bestellung von gefühlten drei Millionen Kleinteilen unterstützt haben, die ich für diese Arbeit und meine Projekte benötigte. Bei Deni Raco bedanke ich mich für die Organisation der unterhaltsamen Pokerabende. Desweiteren bedanke ich mich bei Daoud Ali, Vassily Aliseyko, Vincent Bertram, Miriam Boß, Jonas Böcker, Marita Breuer, Joel Charles, Manuela Dalibor, Florian Drux, Christoph Engels, Dr. Arne Haber, Malte Heithoff, Alexander Hellwig, Steffen Hillemacher, Hendrik Kausch, Dr. Marco Konersmann, Achim Lindt, Daniel Maibach, Dr. Matthias Markthaler, Joshua Mingers, Imke Nachmann, Mathias Pfeiffer, Nina Pichler, Manuel Pützer, Jonas Ritz, Dr. Christoph Schulze, Brian Sinkovec, Max

Stachon, Sebastian Stüber, Louis Wachtmeister, und Dr. Michael von Wenckstern. Bei meinen Hiwis Anno Kleiss, Julian Ruiz und Daniel von Mirbach und meinem Auszubildenden Julius Gummersbach bedanke ich mich dafür, dass sie mich bei der technischen Umsetzung dieser Arbeit unterstützt haben.

Außerdem möchte ich mich bei dem Team im Ford Research and Innovation Center bestehend aus Dr. Marcel Grein, Detlef Kuck, Nicole Eikelenberg, Jeroen Lem, Turgay Aslandere, Moritz Martinius, Alexandra Holz, Roy Hendrikx, Mark Gijbels, Abhinav Dhake und Walter Pijls bedanken durch die ich zum einen spannende Projekte bearbeiten durfte als auch wertvolle Einblicke in die Industrie erhalten habe. Ich danke Alice Minet vom Lehrstuhl für Marketing für die gute Zusammenarbeit bei diesen Projekten. Insbesondere danke ich auch den Mitarbeitern der DSA Daten- und Systemtechnik GmbH für die Unterstützung in technischen Fragen. Dr. Ansgar Schleicher danke ich für die gute Zusammenarbeit bei der Abhaltung der Vorlesung *Der digitale Lebenszyklus von Fahrzeugen als Teil des Internet of Things (IoT)*.

Mein Dank gilt außerdem meinen ehemaligen Betreuern Dr. Martin Serror, René Glebke und Dr. Mirko Stoffers am COMSYS dafür, dass sie mir die Grundlagen des wissenschaftlichen Arbeitens (und Schreibens!) beigebracht haben.

Außerdem danke ich meinen Freunden für die unterhaltsamen Abende durch die wir auch mal von Promotionen und Arbeit abschalten konnten. Von ganzem Herzen danke ich außerdem meinen Eltern und meinem Bruder dafür, dass sie mich nicht nur während der Promotion durch alle Phasen meines Lebens hinweg immer unterstützt haben. Ohne euch wäre mir diese Promotion nicht möglich gewesen.

Aachen, November 2022
Jörg Christian Kirchhof

Contents