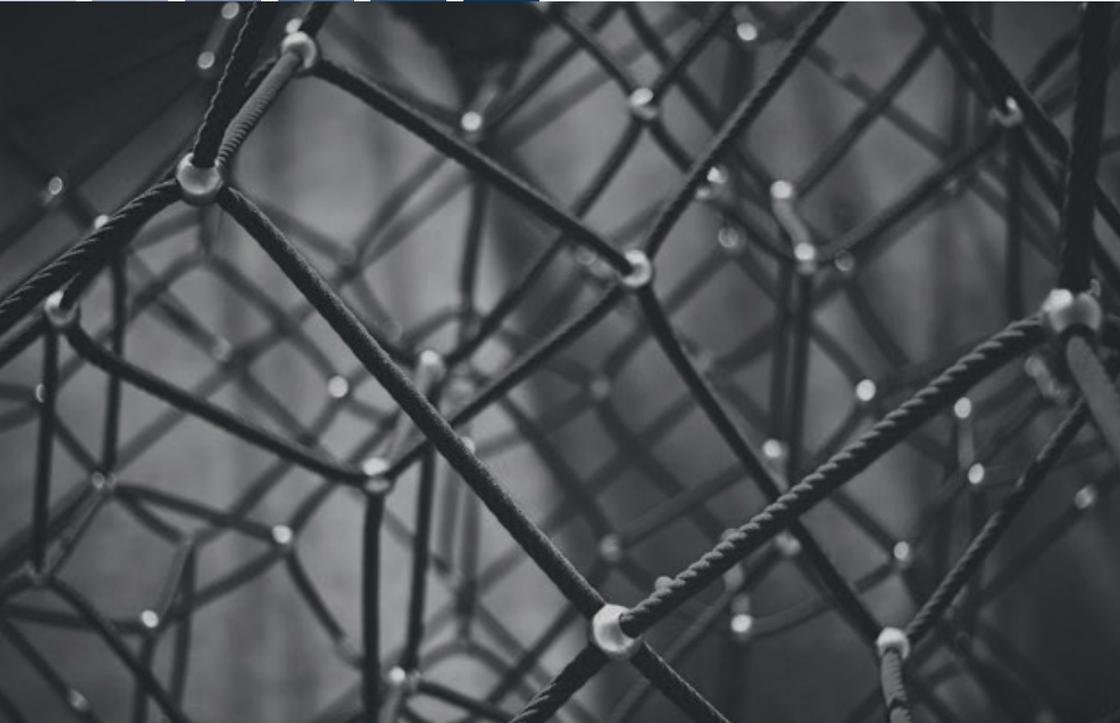


Entwicklung eines Frameworks zur zuverlässigkeitsorientierten funktionalen Gestaltung mechatronischer Systeme in der frühen Phase der Produktentwicklung

Mohamad Wissam Chamas



UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN

ENTWICKLUNG EINES FRAMEWORKS ZUR
ZUVERLÄSSIGKEITSORIENTIERTEN FUNKTIONALEN
GESTALTUNG MECHATRONISCHER SYSTEME IN FRÜHEN
PHASEN DER PRODUKTENTWICKLUNG

Mohamad Wissam Chamas

Master of Science

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieur

– Dr.-Ing. –

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Philipp Höfer
Gutachter: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler

Die Dissertation wurde am 11.11.2019 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht
und durch die Fakultät für Luft und Raumfahrttechnik am 13.08.2020 angenommen.

Die mündliche Prüfung fand am 29.10.2020 statt.

Produktentwicklung

Mohamad Wissam Chamas

Entwicklung eines Frameworks zur zuverlässigkeits-orientierten funktionalen Gestaltung mechatronischer Systeme in der frühen Phase der Produktentwicklung

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7733-9

ISSN 1866-1742

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 • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Bereich der funktionalen Gestaltung in der Antriebsentwicklung bei der BMW AG. Die Arbeit wurde dabei durch Frau Prof. Dr.-Ing. Kristin Pätzold am Institut für Technische Produktentwicklung (LRT 3) der Universität der Bundeswehr München wissenschaftlich betreut.

Mein besonderer Dank gilt meiner Doktormutter Frau Prof. Dr.-Ing. Kristin Pätzold, Leiterin des Instituts für Technische Produktentwicklung (LRT 3) der Universität der Bundeswehr München, für die Betreuung der Arbeit und die wissenschaftliche Unterstützung sowie Förderung meiner Tätigkeit durch richtungsweisende Diskussionen und Gespräche. Ebenso danke ich Frau Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler, Leiterin des Instituts für Produktentstehung, für die Übernahme des Zweitgutachtens. Herrn Prof. Dr.-Ing. Philipp Höfer danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein Dank gilt außerdem all meinen Kollegen bei der BMW AG. Ich möchte mich besonders bei meinem Betreuer Maximilian Thiele für die fachliche Betreuung und den kritischen Diskussionen sowie die persönliche Unterstützung bedanken. Die Motivation durch Herrn Maximilian Thiele in den frühen Phasen als auch bei der Fertigstellung leisteten einen maßgeblichen Beitrag auch aus industrieller Sicht für die Realisierung dieser Arbeit. Ebenso möchte ich meinen Kollegen Sebastian Krems und Dr. -Ing. Max Stanglmeier aus der Doktorandenzeit bei der BMW AG für die kooperative und konstruktive Zusammenarbeit danken. Des Weiteren möchte ich mich bei meinen ehemaligen Vorgesetzten bedanken, Dr. -Ing. Axel Pöhlstein und Henning Gehrke für die Unterstützung zu Beginn und für die mir zugestandenen Freiheiten zum Ende der Arbeit. Dr. -Ing. Matthias Traub danke ich für seine Weitsicht und die Visionen zukünftiger E/E-Architekturen, die mein Bewusstsein in vielen Aspekten erweiterten. Auch gilt ein großer Dank meinem Mentor Dr. -Ing. Detlef König, der mir durch seine Erfahrung sowohl fachlich als auch persönlich mit Rat und Tat zur Seite stand. Weiterhin möchte ich mich auch bei allen Studenten, die ich im Rahmen der Promotion betreuen durfte und allen Mitarbeitern am LRT 3 für die spannenden Diskussionen und Beiträge bei meinen Aufenthalten am Institut bedanken.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, meiner Verlobten Verena Schulze und meinen Freunden, die mich immer unterstützt haben. Persönlich widme ich diese Arbeit meinen Eltern Hussein Chamas und Mona Darwiche, die mich bedingungslos von Beginn an zur Promotion unterstützt und gefördert haben.

"Die Technik entwickelt sich vom Primitiven über das Komplizierte zum Einfachen."
(Antoine de Saint-Exupéry)

Liste der Publikationen

CHAMAS, M.; PAETZOLD, K.: Modeling of Requirement-Based Effect Chains of Mechatronic Systems in Conceptual Stage. In: International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, Vol. 7, No. 3, ISSN: 2319-2518, Juli, 2018, pp. 127 - 134.

CHAMAS, M.; MARKTHAER, M.; RUMPE, B.; PAETZOLD, K.: Bewertungsmethodik zur Verbesserung der Testfallerstellung auf Basis von SysML. In: DfX 2018: 29th Symposium on Design for X, München, 2018, pp. 143 - 153.

CHAMAS, M.; THIELE, M.; PAETZOLD, K.: Ein Ansatz zur holistischen maschinellen Risikoanalyse als Grundlage für die Schnittstellenoptimierung funktionaler Architekturen in einer frühen Phase. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, No. 5, 2019, pp. 123 - 132.

OSZWALD, F.; OBERGFELL, P.; MESETH, M.; CHAMAS, M.; TRAUB, M.; BECKER, J.; SAX, E.: Establishing and Enhancing Agility with Model-based Systems Engineering. In: Proceedings of the 20th International Congress Electronics in Vehicles, Bonn, 2019.

CHAMAS, M.; HOPFENSITZ, W.; OBERGFELL, P.; OSZWALD, F.; TRAUB, M.; PAETZOLD, K.: Entwicklung eines Informationsmodells für eine Hochintegrationsplattform im Automotive-Umfeld. In: Tag des Systems Engineerings, Garching bei München, 2019.

CHAMAS, M.; MEHLSTÄUBL, J.; EICKHOFF, S.; PAETZOLD, K.: Network-based Approach to Increase Logical Reliability of a Vehicle E/E-Architecture. In: Advanced, Contemporary Control, Proceedings of KKA 2020 - The 20th Polish Control Conference, Łódź, 2020.

Kurzfassung

Das zunehmende Kommunikationsaufkommen zwischen Steuergeräten im Fahrzeug durch den stetig ansteigenden E/E-Anteil stellt neue Anforderungen an den Entwicklungsprozess. Die komplexer werdende E/E-Architektur kann auf die hohe Funktionsanzahl und deren Vernetzungen untereinander zurückgeführt werden. Eine Folge dieser Komplexität ist das hohe Fehlerrisiko während der Gestaltungs- und Auslegungsphase von Funktionen. Demzufolge beeinflusst die wachsende Komplexität in der E/E-Architektur die Zuverlässigkeit des Systems. Der Einsatz von bisher bekannten Zuverlässigkeitsmethoden im Bereich der frühen Phasen wirkt dahingehend statisch und monokausal. Vor allem schränken eine unzureichende Datenlage in der frühen Phase und die mangelnde Bedeutung der Zuverlässigkeit in der Funktionsarchitektur den Einsatz von Zuverlässigkeitsmethoden während der Entwicklung stark ein. Um unter diesen Bedingungen Fahrzeuge weiterhin effizient und zuverlässig auf den Markt zu bringen, bedarf es einer neuen Vorgehensweise zur frühzeitigen Analyse der Risiken von Funktionen. Die Kopplung verschiedener Methoden aus der Systemtheorie, der Zuverlässigkeit und Netzwerktheorie in Verbindung mit der Zentralstellung eines Systemmodells durch modellbasierte Systementwicklungsansätze schaffen eine Grundlage, um diesen Herausforderungen zu begegnen. Im Rahmen der Forschungsarbeit wird das MECoRiAD Framework mit dem Ziel zur Erhöhung der Zuverlässigkeit von Funktionskonzepten im gesamtheitlichen Kontext der Systemarchitektur entwickelt. Ausgehend von konkreten Anforderungen aus der Fahrzeugentwicklung wird ein semi-formaler Modellansatz über mehrere Systemebenen erarbeitet. Dabei nehmen Wirkketten eine wichtige Rolle ein, die aus dem Modell extrahiert und für Zuverlässigkeitsanalysen vorbereitet werden. Um die Vernetzungen zwischen den Funktionen abbilden zu können, werden die Wirkketten aus dem Modellansatz zu einem Wirknetz konsolidiert, sodass übergreifende und nicht erkennbare Abhängigkeiten für Entwickler transparent werden. Die Überführung in ein Netzwerk ermöglicht eine strukturelle Analyse der Zuverlässigkeit mithilfe von Metriken aus der Graphentheorie. Auf Basis maschineller Lernverfahren soll das strukturelle und implizite Verhalten des Wirknetzes als Grundlage für eine Risikoanalyse dienen, um kritische Knoten und somit Schwachstellen im System identifizieren zu können. Die Nutzung regelbasierter Algorithmen unterstützen anschließend beim Aufdecken kritischer Muster im Wirknetz, die eine Zuverlässigkeit negativ beeinflussen können und erhöhen damit die Transparenz trotz einer hohen Informationsdichte. Ferner gilt es auch als Ziel, die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten zu limitieren, um den Kommunikationsbedarf und folglich die Fehlerrisiken zu minimieren. Ein Optimierungsmodell zur Reduktion von Informationsflüssen zeigt eine Möglichkeit auf, Funktionskonzepte dynamisch in die Systemarchitektur zu integrieren. Die einzelnen Bausteine des Frameworks wurden mit praxisnahen Beispielen aus der aktuellen Fahrzeugentwicklung evaluiert, um die Tauglichkeit des Frameworks für den Einsatz in dem Serienprozess zu bestätigen. Die Komplexitätsbeherrschung in der zuverlässigkeitsorientierten Gestaltung und Partitionierung funktionaler Konzepte in eine Systemarchitektur hat sich durch das Framework signifikant verbessert.

Abstract

Growing traffic of communication between electrical control units due to continuously increasing share of electric and electronical systems in vehicles sets new requirements for development processes. As the e/e-architecture becomes more and more complex, it can be explained by the high number of functions and their interconnections. One consequence of this complexity is the high risk of errors during design and partitioning phase of functions. Hence, increasing complexity in e/e-architecture has impacts on systems reliability. The application of previously known reliability methods in the area of early phases has static and monocausal properties. Especially insufficient data quality in early phase and the lack of importance of reliability in functional architecture severely limit the use of reliability methods during development. In order to bring vehicles onto the market efficiently and reliably under these conditions, it is necessary to provide support for early analysis of risks arising from functions and their connections. A combination of different methods from system theory, reliability and network theory along with the central position of a system model through model-based system development approaches build a basis to meet these challenges. During the research work, a Framework MECoRiAD is developed to increase reliability of functional concepts in overall context of system architecture. Based on specific requirements from vehicle development, a semi-formal model approach will be established over several system levels. Thereby, effect chains play an important role, which derive from modeling step and prepared for reliability analysis. In order to illustrate connections between functions, independent effect chains from modeling step are consolidated into an effect network, so that unknown and hidden dependencies become more transparent for developers. Transformation into an effect network allows structural reliability analysis using metrics of graph theory. On the basis of machine learning methods, structural and implicit behavior of the effect network will serve for a risk analysis in order to identify critical weak spots in the system. Using rule-based algorithms, the following process supports finding critical patterns in the effect network that can influence reliability negatively. Despite of a high information density, transparency can therefore be ensured. Part of the goal is also the limitation of dependencies between components in order to minimize traffic of communication and hence the risk of errors. An optimization model for reduction of information flows shows a possible way to integrate functional concepts into system architecture dynamically. Each block of the framework is evaluated by practical examples from current vehicle projects to demonstrate suitability of the framework for application in series development. Mastering complexity in reliability-oriented design and partitioning of functional concepts in a system architecture has been significantly improved by this framework.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Zielsetzung	4
1.2. Struktur der Arbeit	5
2. Stand der Wissenschaft und methodische Grundlagen	9
2.1. Grundlagen der Systemtheorie	9
2.1.1. Systemverständnis	9
2.1.2. Komplexität von Systemen	11
2.2. Entwicklungsansätze in einer frühen Phase	12
2.2.1. Entwicklungsmethodik für mechatronische Produkte	13
2.2.2. Funktionale Gestaltung	16
2.2.3. Bedeutung und Charakteristika früher Phasen	23
2.2.4. Architekturprinzipien in der Systemtheorie	26
2.3. Zuverlässigkeit und Methoden zu ihrer Bewertung	32
2.3.1. Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse	34
2.3.2. FTA	38
2.3.3. Bayes´ches Netz	39
2.3.4. Markov-Analyse	41
2.4. Systems Engineering	43
2.4.1. Grundlagen des Systems Engineering	44
2.4.2. Model-Based Systems-Engineering	45
2.5. Problemabgrenzung	47
2.6. Anforderungen an den Lösungsansatz	49
3. Stand der Technik	55
3.1. Vorgehensmethoden zur Systemmodellierung	55
3.1.1. OOSEM	56
3.1.2. Harmony SE	57
3.1.3. FAS	58
3.1.4. CONSENS	60
3.2. Zuverlässigkeitsanalysen auf Basis von Systemmodellen	62
3.2.1. Qualitative Zuverlässigkeitsanalysen auf Basis eines Systemmodells	63
3.2.1.1. Strukturelles Komplexitätsmanagement nach Maurer	63
3.2.1.2. Architekturmodell nach Alt	64
3.2.1.3. CONSENS	65

3.2.1.4. SafeML	65
3.2.1.5. KAUSAL-Methodik	66
3.2.2. Analytische Zuverlässigkeitsanalysen auf Basis eines Systemmodells	68
3.2.2.1. MeDISIS	68
3.2.2.2. Functional Failure Identification and Propagation (FFIP)	70
3.2.2.3. Netzwerkbasierter FMEA-Ansatz nach Chahin	71
3.2.2.4. Failure Identification and Propagation nach Liu	72
3.2.2.5. Weitere naheliegende Arbeiten modellzentrierter Zuverlässigkeitsanalysen	73
3.3. Methoden zur qualitativen Systemmodellierung	74
3.3.1. Werkzeug und Sprache der SysML	74
3.3.2. Matrixbasierte Methoden zur Systemmodellierung	76
3.3.3. Anwendung der Graphentheorie im Umgang mit großen Datenmengen	78
3.3.4. Entity Relationship Modell	80
3.3.5. Petri-Netz	81
3.4. Bewertung und Handlungsbedarfe aus dem Stand der Technik	82
3.5. Verfeinerte Zielsetzung aus dem Stand der Technik	86
4. Das Framework MECoRiAD - zuverlässigkeitsorientierte Gestaltung von Funktionen	91
4.1. Erfolgsfaktoren der Funktionsarchitektur	91
4.2. Das MECoRiAD-Framework	93
4.3. Quadrant 1 - Systematik	95
4.3.1. Methode zur Modellierung funktionaler Wirkketten	95
4.3.2. Werkzeug zur Wirkkettenmodellierung	99
4.3.3. Validierung der Wirkkettenmodellierung anhand des Beispiels <i>Radmoment stellen</i>	100
4.3.3.1. Radmoment stellen - Requirement Analysis	100
4.3.3.2. Radmoment stellen - System Functional Analysis	103
4.3.3.3. Radmoment stellen - Design Synthesis	104
4.3.3.4. Wirkketten als Grundlage für den FMEA-Strukturbaum	107
4.3.4. Zwischenfazit	108
4.4. Quadrant 2 - Holistik	109
4.4.1. Konflikte bei der Modellintegration	110
4.4.2. Wirknetztransformation zur Schaffung der Multikausalität	111
4.4.3. Konsolidierung der Wirkketten	112
4.4.3.1. Regelbasierter Datenimport	115
4.4.3.2. Korrekturen der Modellierungsfehler	118
4.4.3.3. Zusammenführung der Wirkketten	122
4.4.3.4. Reduktion operativer Knoten	125
4.4.3.5. Entfernung der Hilfeebenen	126
4.4.4. Ergebnis der Konsolidierungsphase	127

4.5. Quadrant 3 - Objektivierung	128
4.5.1. Strukturelle Risikobewertung	129
4.5.1.1. Grundzüge der Metrik	130
4.5.1.2. Auswahl der Kennzahlen	131
4.5.1.3. Average Clustering Coefficient	132
4.5.1.4. Average Degree	133
4.5.1.5. Average Number of Cycles	133
4.5.1.6. Fitness Value	133
4.5.1.7. Graph Energy	135
4.5.1.8. Relative Centrality	135
4.5.1.9. Strukturrobustheit	136
4.5.1.10. Methode zur Ermittlung der Kennzahlausprägung	138
4.5.1.11. Grenzbereiche zur Bewertung der Handlungsbedarfe	144
4.5.1.12. Anwendung der strukturellen Analyse an der Fahrassistenzfunktion Adaptive Cruise Control	147
4.5.1.13. Zwischenfazit	154
4.5.2. Maschinelle Risikoanalyse	155
4.5.2.1. Traditionelle Risikoanalyse	156
4.5.2.2. Festlegung der Trainingsdaten	158
4.5.2.3. Regressionsmodell - Überwachtes Lernverfahren	161
4.5.2.4. Qualität des Regressionsmodells	164
4.5.2.5. Skalierung der Risikostufen	166
4.6. Quadrant 4 - Design	167
4.6.1. Mustererkennung in komplexen Strukturen - Erfolgsfaktor Transparenz	168
4.6.1.1. Differenzierung der Wirkketten	170
4.6.1.2. Identifikation der Schnittstellenaufgaben	171
4.6.1.3. Erfassung der Zyklen	171
4.6.1.4. Ping-Pong Effekte zwischen Funktionsträgern	172
4.6.1.5. Lokalisierung der kritischen Aufgaben	173
4.6.1.6. Kritischer Pfad	174
4.6.1.7. Fehlerfortpflanzung	175
4.6.2. Optimierung der Schnittstellengestaltung des Wirknetzes - Erfolgsfaktor Disjunktheit	176
4.6.3. Anwendung des Optimierungsmodells an der Fahrzeugfunktion <i>Ladevorgang vorbereiten</i>	185
4.7. Zusammenfassung des Frameworks MECoRiAD	188
5. Validierung des Frameworks MECoRiAD	191
5.1. Bewertung des Frameworks MECoRiAD - Validierung 1	192
5.2. Validität der Dimensionen - Validierung 2	197
5.2.1. Validierung des Informationsflusses zwischen der Systematik und der Holistik	200
5.2.2. Validierung des Informationsflusses zwischen der Holistik und der Objektivierung	203

5.2.3. Validierung des Informationsflusses zwischen der Objektivierung und dem Design	205
5.2.4. Validierung des Informationsflusses zwischen dem Design und der Systematik	207
6. Zusammenfassung und Ausblick	213
6.1. Zusammenfassung	213
6.2. Ausblick	214
Abbildungsverzeichnis	221
Tabellenverzeichnis	223
Algorithmenverzeichnis	226
Literaturverzeichnis	245
A. Anhang	247
B. Anhang	249
C. Anhang	265