



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**



Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Bracke
Lehrstuhl für Zuverlässigkeitstechnik und Risikoanalytik

Marcin Hinz

Concept for Machine Learning and Field Data driven Adjustment of Testing Conditions of Technical Prototypes

Band 3



Chair for Reliability Engineering and Risk Analytics

**Concept for Machine Learning and
Field Data driven Adjustment of
Testing Conditions of Technical Prototypes**

**Approved dissertation
to obtain the doctoral degree
Doctor of Engineering (Dr.-Ing.)**

at the faculty of
mechanical and safety engineering
at the University of Wuppertal

Submitted by:
Marcin Hinz
from Bydgoszcz (Poland)

Wuppertal, 10th April 2018

Berichte aus der Zuverlässigkeitsanalytik und Risikoforschung

Band 3

Marcin Hinz

**Concept for Machine Learning and
Field Data driven Adjustment of
Testing Conditions of Technical Prototypes**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Wuppertal, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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 978-3-8440-6022-5

ISSN 2199-1251

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

*We can't solve our problems
by using the same kind of thinking
we used to create them.*

~ Albert Einstein ~

Danksagung - Acknowledgements

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Zuverlässigkeitstechnik und Risikoanalytik an der Bergischen Universität Wuppertal.

Ich möchte mich bei allen Personen bedanken, die mir auf dem Weg zur Fertigstellung dieser Dissertation behilflich waren. Die ersten Dankesworte gebühren meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Bracke. Er gab mir nahezu jegliche, arbeitstechnische als auch finanzielle Freiheit bei der Planung, Durchführung und Vollendung meiner Forschung. Ich danke für seine Unterstützung, die vielfältigen und fachlichen Anregungen, das entgegengebrachte Vertrauen sowie die freundschaftliche Zusammenarbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro vom Lehrstuhl für Dynamik und Mechanik an der Universität Paderborn danke ich herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens. Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Friederike Deuerler und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt möchte ich für die Mitarbeit in der Prüfungskommission danken.

Weiterer, großer Dank gilt Herrn M.Sc. Chethan Mohan Kumar, Herrn M.Sc. Christoph Rosebrock, Herrn M.Sc. Fabian Reinecke und Herrn Lars von der Horst, die für das Gelingen dieser Arbeit einen wesentlichen Beitrag geleistet haben. Ein besonderer Dank für die großartige Unterstützung sowie wertvolle Ideen gilt an dieser Stelle Frau B.Sc. Bianca Backes. Weiterhin möchte ich mich bei allen meinen Kolleginnen und Kollegen vom Lehrstuhl für Zuverlässigkeitstechnik und Risikoanalytik, die über die Jahre zu guten Freunden geworden sind, bedanken.

Mein weiterer Dank gilt meinen Freunden M.Sc. Michael Dawidowicz, M.Sc. Andreas Lücker sowie M.Sc. Jens Michalski, die mich während meiner gesamten wissenschaftlichen Karriere sowohl fachlich als auch persönlich begleitet haben.

Nicht zuletzt möchte ich mich ganz besonders bei meiner Familie bedanken. Insbesondere meiner Mutter Grażyna, die mir eine akademische Laufbahn erst ermöglicht und immer an mich geglaubt hat. Zudem danke ich meiner Freundin Susann, die mir mit Verständnis und Liebe einen Ausgleich zu meiner Arbeit gegeben hat.

Abstract

The present dissertation deals with the adjustment of test scenarios of technical prototypes. The overall objective of this research work is the development of a concept for the detection of differences between defect and non-defect products regarding a redesign of test procedures. Here, the primary aim is the identification of distinctive features within the usage phase of damaged products and application of the obtained knowledge in the test phase of the next generation products.

Foundation of the present, practice-oriented concept are the gathered recorded data of damaged products as well as the data of the remaining, defect-free product fleets, which are simulated with regard to the empirical knowledge. For this purpose, an appropriate data collection method based on the field data is introduced. Furthermore, algorithms developed for the simulation of the remaining fleets with respect to the recorded data are presented. Subsequently, a further approach as a part of the concept for the derivation of relevant characteristics as well as generation of meaningful training data out of the gathered data material is discussed in detail.

An essential part of the presented concept is the application of various machine learning algorithms as well as goal-oriented interpretation of the results and deduction of corresponding conclusions. For this purpose, potentially unknown load scenarios which have to be applied during the testing phase are developed. Beyond the redevelopment of test scenarios, which are not yet integral parts of the test plans, quantitative justifications of the existing test plans are in focus of this research work. Existing plans are proved regarding their influence on the reliability of the product and test conditions are reduced in case of insignificant impacts.

The proposed concept has a generic character and is suitable for all products in the consumer goods and investment goods sector, in which the possibility of the field data gathering is given. The application of the concept is performed based on various examples from the automotive industry. Based on on-board diagnostics, simulated and recorded data in form of specific signals is used for the analysis and interpretation of the gathered results. Finally, the achieved outcomes are discussed and verified regarding the applicability and practical feasibility.

Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit der Anpassung von Testszenarien technischer Prototypen. Ziel der Arbeit ist die Erstellung eines Konzepts zur Detektion von Unterschieden zwischen fehlerhaften und fehlerfreien Produkten im Hinblick auf die Neugestaltung von Versuchsabläufen. Dabei wird die Ermittlung von Auffälligkeiten innerhalb der Produktnutzungsphase von schadhafte Produkten und die Applikation der gewonnen Erkenntnisse bei der Erprobung der nachfolgenden Produktgenerationen fokussiert.

Ausgangsbasis des vorgestellten, praxisorientierten Konzepts bilden die erhobenen Daten von fehlerhaften Produkten sowie die Daten der verbleibenden Produktflotten, die auf Basis von Annahmen sowie empirischen Erkenntnissen simuliert wurden. Hierzu wird ein geeignetes Konzept zur Erhebung der Felddaten vorgestellt. Des Weiteren werden die zu den Felddaten passenden und neuentwickelten Simulationsalgorithmen präsentiert. Anschließend wird im Rahmen des Gesamtkonzepts ein Ansatz für die Ableitung von relevanten Kenngrößen sowie Erzeugung von aussagekräftigen Trainingsdaten aus dem erhobenen Datenmaterial diskutiert.

Einen wesentlichen Aspekt des Konzepts stellt die Anwendung verschiedener Algorithmen des maschinellen Lernens sowie die gezielte Interpretation der Ergebnisse und Ableitung entsprechender Schlussfolgerungen dar. Dazu werden potentiell unbekannte Belastungsszenarien entwickelt, die von Produktentwicklern innerhalb der Erprobung umgesetzt werden müssen. Über die Neuentwicklung von Testszenarien hinaus, die noch kein Bestandteil der vorhandenen Erprobungspläne sind, stehen quantitativ begründete Anpassungen der existierenden Testpläne im Fokus. Bestehende Testbedingungen werden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Zuverlässigkeit des Produktes geprüft und bei vernachlässigbaren Auswirkungen reduziert.

Das vorgestellte Konzept hat einen generischen Charakter und ist geeignet für den gesamten Konsumgüter- sowie Investitionsgüterbereich, in dem sich Felddaten erfassen lassen. Die Umsetzung des Konzepts wird anhand von mehreren Fallbeispielen aus der Automobilindustrie auf ihre Wirksamkeit geprüft. Dazu werden den Analysen sowohl simulierte als auch aufgezeichnete, On-Board-Diagnose spezifische Daten in Form von Signalen herangezogen. Schließlich werden die erzielten Ergebnisse im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit diskutiert und verifiziert.

Streszczenie

W ramach niniejszej rozprawy doktorskiej opracowano testowe scenariusze prototypów urządzeń technicznych. Głównym zadaniem prac badawczych było opracowanie koncepcji wykrywania różnic pomiędzy urządzeniami wadliwymi a nieszkodzonymi w celu przeprojektowania procedur testowych. Nadrzędnym zadaniem była identyfikacja widocznych wad występujących w fazie użytkowania oraz zastosowanie zdobytej wiedzy podczas testowania urządzeń nowej generacji.

Podczas opracowywania niniejszej koncepcji wykorzystano dane pochodzące z zarejestrowanych, uszkodzonych produktów, a dla urządzeń wolnych od wad, brakujące informacje uzyskano w wyniku symulacji bazującej na wiedzy empirycznej. Odpowiednia metoda gromadzenia danych została zastosowana, a innowacyjne algorytmy symulujące brakujące dane zostały dokładnie opisane w niniejszej dysertacji. Następnie, w ramach ogólnej koncepcji, szczegółowo opisano metodę określania odpowiednich parametrów oraz generowania zbioru danych treningowych ze zgromadzonego materiału.

Istotną częścią prezentowanej metody było zastosowanie różnych algorytmów uczenia maszynowego, jak również właściwa interpretacja uzyskanych wyników oraz wyciągnięcie odpowiednich wniosków. W tym celu opracowano potencjalnie nieznane scenariusze obciążeń, które powinny być zastosowane w fazie testowej. Poza przebudową scenariuszy testowych, które aktualnie nie stanowią jeszcze integralnej części planów testowych, prace badawcze koncentrują się na ilościowych uzasadnieniach istniejących planów testowych. Udowodniono, że istniejące plany mają wpływ na niezawodność urządzenia, a w przypadku oddziaływań nieistotnych warunki testowe ulegają zmianie.

Proponowane rozwiązanie ma charakter ogólny i jest odpowiednie dla wszystkich produktów z branży dóbr konsumpcyjnych i inwestycyjnych, dla których istnieje możliwość zgromadzenia danych użytkowych. Aktualnie, metoda ta została zaprezentowana na przykładach urządzeń pochodzących z przemysłu motoryzacyjnego. W końcowej części pracy omówiono uzyskane wyniki oraz dokonano ich weryfikacji pod względem możliwości zastosowania i praktycznej wykonalności.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Aims of the Study	2
1.2	Structure of the Study	3
2	Fundamentals	5
2.1	Terms, definitions and statistical characteristic quantities	5
2.2	Statistical distribution models	7
2.2.1	Uniform distribution	7
2.2.2	Normal distribution	9
2.2.3	Exponential distribution	10
2.2.4	Weibull distribution	12
2.2.5	Poisson distribution	13
2.3	Parameter estimation	14
2.4	Sampling	16
2.5	Monte Carlo method	18
2.6	Fourier transform	20
2.7	Machine learning	23
2.7.1	C4.5	24
2.7.2	NNge	25
3	State of the art	27
3.1	Testing	27
3.1.1	Design of Experiments	29
3.2	On-board diagnostics	30
3.2.1	Development of OBD	33
3.2.2	Data communication	36
3.2.3	OBD specific data	38

4	Concept for the adjustment of test procedures	39
4.1	Fundamentals of the concept	39
4.2	Data gathering	45
4.2.1	Data record	47
4.2.2	Data simulation	48
4.3	Data processing	57
4.3.1	Univariate analysis of the collected data	59
4.3.2	Analysis of single signals without dynamic characteristics . . .	60
4.3.3	Analysis of single signals with dynamic characteristics	61
4.3.4	Multivariate analysis of the data	65
4.4	Analysis of distinctions	71
4.4.1	Live monitoring of the product	71
4.4.2	The post-mortem method	72
4.4.3	Possibilities of the optimization of the test conditions	73
5	Data collection and processing in automotive engineering - test cases	75
5.1	Real data logging	75
5.2	Simulation of the fleet data	83
5.3	Processing the training data	92
6	Analysis of distinctions in automotive engineering - test cases	97
6.1	Particular vehicles vs. corresponding fleets	98
6.2	Particular vehicles vs. entire fleet	105
6.3	All vehicles vs. entire fleet	106
7	Summary and outlook	109
	Bibliography	vii
A	List of abbreviations	xv
B	Notations	xvii
C	Parameter IDs and signals of remaining control units	xxi
D	Test cases - results of NNge algorithm	xxxii
E	Curriculum Vitae	lxxix

List of Figures

2.1	Uniform distribution	8
2.2	Normal distribution	10
2.3	Exponential distribution	11
2.4	Weibull distribution	13
2.5	Poisson distribution	14
3.1	Development of OBD - time-line	34
3.2	Diagnostic connections - Type A (left) and Type A (right)	36
4.1	The overall idea of the concept - link between two following generations of a product	40
4.2	The concept - graphical illustration	42
4.3	OBD II - logger: front side with USB connection (left) and rear side with Controller Area Network (CAN) bus connector of type B (right)	46
4.4	Signals with and without dynamic characteristics	49
4.5	Various driver types expressed by the means of the Weibull distribution	51
4.6	Poisson/MCM Algorithm	53
4.7	Measured and simulated as well as corrected signals of the engine coolant temperature	54
4.8	Graphical representation of the MCM/FFT Algorithm	55
4.9	FFT/MCM simulated and corrected velocity signals	56
4.10	Signal analysis	58
4.11	Analysis of a signal without dynamic characteristics	61
4.12	Analysis of a signal with dynamic characteristics	62
4.13	Bivariate correlation analysis	66
4.14	Comparison of regression and correlation analysis	69
4.15	Multivariate empirical analysis of the vehicle speed and engine rpm	70
4.16	Data structure for machine learning process in form of matrices	73

5.1	CDF of ride durations of all cars based on Weibull distributions	79
5.2	PDF of ride durations of all cars based on Weibull distributions	79
5.3	Comparison of measurement and simulation based on velocity curves of BMW Z4	86
5.4	Comparison of measurement and simulation based on engine rpm curves of Mercedes CLK	86
5.5	Comparison of measurement and simulation based on engine load curves of BMW X3	87
5.6	Comparison of measurement and simulation based on mass air flow curves of Hyundai iX	87
5.7	Comparison of measurement and simulation based on air temperature curves of Opel Astra	90
5.8	Comparison of measurement and simulation based on battery voltage curves of Chevrolet Aveo	90
5.9	Comparison of measurement and simulation based on intake air manifold pressure curves of Seat Leon	91
5.10	Comparison of measurement and simulation based on coolant temperature curves of Peugeot 208	91
6.1	Decision tree - BMW X3 vs. BMW X3 fleet	99
6.2	Decision tree - BMW Z4 vs. BMW Z4 fleet	103
6.3	Decision tree - Chevrolet Aveo vs. Chevrolet Aveo fleet	104
6.4	Decision tree - Hyundai iX vs. Hyundai iX fleet	105
6.5	Decision tree - Hyundai iX vs. entire fleet	106
6.6	Decision tree - All records vs. entire fleet	107

List of Tables

2.1	Selected distribution functions and the corresponding inverse distribution functions	18
3.1	OBD II Modes	38
4.1	Amount of produced cars in 2015, World Ranking of OEM	48
5.1	Properties of all used OBD loggers	76
5.2	Recorded vehicles	77
5.3	Major properties of recorded fleets	78
5.4	All recorded OBD signals	81
5.5	Car rides and signals of recorded cars	83
5.6	Choice of signals for the simulation of car fleets	84
5.7	Signal types and according algorithms for all simulated signals	85
5.8	Major properties of simulated fleets	89
5.9	List of all attributes provided as training data	95
6.1	BMW X3 record vs. BMW X3 fleet	100
C.1	List of all used PIDs with values, units and explanations	xxi
C.2	List of all additional control units and the belonging signals	xxvi
D.1	BMW Z4 record vs. BMW Z4 fleet	xxxi
D.2	Chevrolet Aveo record vs. Chevrolet Aveo fleet	xxxiii
D.3	Mercedes CLK record vs. Mercedes CLK fleet	xxxvi
D.4	Hyundai iX record vs. Hyundai iX fleet	xxxix
D.5	Opel Astra record vs. Opel Astra fleet	xli
D.6	Peugeot 208 record vs. Peugeot 208 fleet	xliv
D.7	Seat Leon record vs. Seat Leon fleet	xlvii

D.8 BMW X3 record vs. entire fleet	1
D.9 BMW Z4 record vs. entire fleet	liii
D.10 Chevrolet Aveo record vs. entire fleet	lvi
D.11 Mercedes CLK record vs. entire fleet	lix
D.12 Hyundai iX record vs. entire fleet	lxii
D.13 Opel Astra record vs. entire fleet	lxv
D.14 Peugeot 208 record vs. entire fleet	lxvii
D.15 Seat Leon record vs. entire fleet	lxx
D.16 Ford Kuga record vs. entire fleet	lxxiii
D.17 All records vs. entire fleet	lxxvi