

Entwicklung eines Modells zur Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Bima Raymond-Sati Djaloeis

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Christopher Marc Schlick
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen

Tag der mündlichen Prüfung: 29. September 2015

Industrial Engineering and Ergonomics

Band 18

Bima Raymond-Sati Djaloelis

Entwicklung eines Modells zur Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung

Shaker Verlag
Aachen 2015

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, 2015)

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4005-0

ISSN 1865-4665

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

Für meine Familie

und Freunde

„Wichtig ist, dass man nicht aufhört zu fragen.“

– Einstein (1955)

Vorwort

Bei der Produktentwicklung handelt es sich um einen äußerst komplexen Funktionsbereich, in dem technische Aufgabenstellungen mit einschlägigen Entwicklungs- und Konstruktionsmethoden durch die Erfüllung von hierarchisch gegliederten, latent unsicheren und sich z.T. im Zielkonflikt befindlichen Anforderungen auf allen Ebenen des systematischen Konstruierens zu lösen sind. Daher empfiehlt sich generell ein iteratives Vorgehen, in dem situativ zwischen systematischen und opportunistischen Handlungsweisen gewechselt wird. Aufgrund der strukturellen und dynamischen Komplexität mangelt es an wissenschaftlich fundierten Analysen, die neben der menschlichen Leistung auch die menschliche Zuverlässigkeit betrachten. Vor diesem Hintergrund entwickelt der Autor einen theoretischen Ansatz zur Analyse und Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit in Produktentwicklungsprozessen. Im Mittelpunkt steht eine phasenabhängige Taxonomie, die auch rückgekoppelte Wirkzusammenhänge abzubilden vermag. Daran anknüpfend wird eine Untersuchungsmethodik entworfen, mit der Einflussfaktoren auf die menschliche Zuverlässigkeit in einem kombinatorisch-informativ-informatorischen Entwicklungsprozess unter Laborbedingungen empirisch analysiert werden können. Auf dieser Grundlage wurden zwei Untersuchungen mit insgesamt 196 Versuchspersonen durchgeführt. Die Daten werden in Form von Bayes-Netzen modellhaft verdichtet, so dass nicht nur spezifische Empfehlungen zum Konstruktionshandeln gegeben werden können, sondern auch Vorhersagen hinsichtlich des Erfüllungsgrads der Anforderungen sowie dem korrespondierenden Iterationsbedarf ermöglicht werden. Die Ergebnisse zeigen u.a., dass generell ein systematisches, konstruktionsmethodisches Vorgehen zu empfehlen ist, da es zu einer zu einer höheren Erfüllungsquote der Produktanforderungen und geringeren Iterationswahrscheinlichkeit führt. Ein opportunistisches Vorgehen sollte erst bei hohem Zeitdruck in Betracht gezogen werden. Die vorliegende Schrift stellt einen ersten Schritt dar, um die vielfältigen Anforderungen der Produktentwicklung und die komplexen Wirkzusammenhänge in einem integrierten Modell abzubilden. Durch die theoretischen und empirischen Analysen ausgewählter Zusammenhänge wird ein wichtiger Beitrag zur Analyse menschlicher Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung geleistet.

Christopher M. Schlick

Vorveröffentlichte Teilergebnisse

- Djaloeis, R.; Duckwitz, S.; Rotmann, V.; Feldhusen, J.; Schlick, C.: Empirische Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung beim Konstruktionshandeln, In: Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft - 60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Hrsg.: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V., GfA-Press, Dortmund 2014, ISBN 978-3-936804-17-1, S. 321-323
- Djaloeis, R.; Duckwitz, S.; Frenz, M.; Hinsch, M.; Feldhusen, J.; Schlick, C.: Laborversuche zur Analyse menschlicher Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung, In: Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung - Zukunftsfähigkeit für Produktions- und Dienstleistungsunternehmen, Bericht zum 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 27.02., Hrsg.: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V., GfA-Press, Dortmund 2013, ISBN 3-978-3-936804-14-0, S. 271-274
- Djaloeis, R.; Duckwitz, S.; Hinsch, M.; Feldhusen, J.; Schlick, C.: A New Method for Human Reliability Analysis, In: Smart Product Engineering: Proceedings of the 23rd CIR P Design Conference, Bochum, Germany, March 11th-13th, 2013, Hrsg.: Abramovici, M.; Stark, R., Springer, Heidelberg 2013, ISBN 978-3-642-30817-1, S. 623-632
- Djaloeis, R.; Duckwitz, S.; Hinsh, M.; Feldhusen, J.; Schlick, C.: Analysis of Human Reliability in Computer-Aided Design: Influence of different frequencies of interruption, In: 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Hrsg.: IEEE, IEEE, Manchester 2013, ISBN 978-1-4799-0652-9/13, S. 249-256
- Djaloeis, R.; Duckwitz, S.; Hinsch, M.; Feldhusen, J.; Schlick, C.: Human reliability and workload in product design with different frequencies of interruption, In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Hrsg.: Laosirihongthong, T.; Jiao, R.; Xie, M., IEEE, Singapore 2013, ISBN 978-1-4799-0985-8, S. 5
- Djaloeis, R.; Frenz, M.; Duckwitz, S.; Hinsch, M.; Feldhusen, J.; Schlick, C.: Empirische Analyse von menschlicher Leistung und menschlicher Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung, In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, Hrsg.: Spath D.; Bertsche, B.; Binz, H., Fraunhofer IAO, Stuttgart 2013, ISBN 978-3-8396-0573-8, S. CD-ROM
- Djaloeis, R.; Frenz, M.; Duckwitz, S.; Hinsch, M.; Feldhusen, J.; Schlick, C.: Empirical Analysis of Product Design with Different Times and Interruption Levels, In: International Conference on Engineering and Product Design Education, 5. and 6. September 2013, Dublin Institute of Technology, (2013), ISBN 978-1-904670-42-1, S. 184-189
- Djaloeis, R.; Frenz, M.; Duckwitz, S.; Hinsch, M.; Feldhusen, J.; Schlick, C.: Laborversuche zur Analyse menschlicher Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung, In: 11. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Hrsg.: Brökel, K.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Rieg, F.; Stelzer, R., Aachen, (2013), ISBN 978-3-8440-2182-0, ISSN 1438-4930, S. 375-385

- Hinsch, M.; Heller, J.; Djaloeis, R.; Schlick, C.; Feldhusen, J.: Improving Result Quality in Engineering Design by Better Linking Employee's and Task's Features, In: Smart Product Engineering: Proceedings of the 23rd CIR P Design Conference, Bochum, Germany, March 11th-13th, 2013, Hrsg.: Abramovici, M.; Stark, R., Springer, Heidelberg 2013, ISBN 978-3-642-30817-1, S. 515-524
- Djaloeis, R.; Duckwitz, S.; Hinsch, M.; Feldhusen, J.; Schlick, C.: Analysis of Human Reliability in Computer-Aided Design, In: Conference Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, October 14-17, 2012, COEX, Seoul, Korea, Hrsg.: IEEE, Seoul 2012, ISBN 978-1-4673-1712-2, S. 868-873
- Djaloeis, R.; Frenz, M.; Schlick, C.: Einflußfaktoren zur Analyse menschlicher Fehler und Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung, In: Gestaltung nachhaltiger Arbeitssysteme - Wege zur gesunden, effizienten und sicheren Arbeit, Bericht zum 58. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 22. bis 24. Februar 2012 an der Universität Kassel, Hrsg.: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V., GfA-Press, Dortmund 2012, ISBN 978-3-936804-12-6, S. 619-622
- Duckwitz, S.; Djaloeis, R.; Hinsch, M.; Feldhusen, J.; Schlick, C.: Consideration of Human Reliability in Actor-Oriented Simulation of New Product Development, In: IEEM 2012 - 2012 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, , Hongkong 2012, ISBN 978-1-4763-2944-6, S. 1696-1700

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Problemstellung	3
1.3 Ziel der Arbeit	3
1.4 Vorgehensweise	4
2. Grundlagen	5
2.1 Produktentwicklung	5
2.1.1 Einordnung in den Produktlebenszyklus	5
2.1.2 Definition der Produktentwicklung	6
2.1.3 Prozessmodelle	15
2.1.4 Handlungsregulation in der Produktentwicklung	19
2.1.5 Kategorisierung von Anforderungen	21
2.1.5.1 Anforderungen mit Produktbezug	21
2.1.5.2 Anforderungen mit Prozessbezug	22
2.1.5.3 Anforderungen mit Personenbezug	22
2.1.5.4 Anforderungen mit Umweltbezug	24
2.1.6 Einzel- und Gruppenarbeit	25
2.1.7 Computergestützte Produktentwicklung	28
2.2 Menschliche Zuverlässigkeit	29
2.2.1 Einordnung in die Arbeitswissenschaft	29
2.2.2 Definition der menschlichen Zuverlässigkeit	30
2.2.3 Arbeitsformen in Hinblick auf die menschliche Zuverlässigkeit	30
2.2.4 Ebenenmodelle der menschlichen Zuverlässigkeit	31
2.2.5 Taxonomie von Einflussfaktoren der menschlichen Zuverlässigkeit	33
2.2.5.1 Menge der verfügbaren Zeit	36
2.2.5.2 Frequenz von Unterbrechungen	37

2.2.6	Charakteristik der Aufgabe	39
2.2.7	Auswirkungen einer begrenzten menschlichen Zuverlässigkeit	39
2.2.8	Subjektiv empfundene Beanspruchung	40
2.2.9	Analyse menschlicher Zuverlässigkeit	43
2.2.9.1	Statistische Methoden auf Basis der angewandten Schätztheorie	45
2.2.9.1.1	THERP	50
2.2.9.1.2	HCR	51
2.2.9.1.3	SLIM-MAUD	53
2.2.9.1.4	Simulationsmodell von Steidel, Licht und Duckwitz et al.	55
2.2.9.1.5	Bayes-Netze	57
2.2.9.2	Methoden auf Basis von Modellen menschlicher Informationsverarbeitung	58
2.2.9.2.1	GEMS	60
2.2.9.2.2	CREAM	62
3.	Entwicklung eines integrierten Modells zur Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung	64
3.1	<i>Entwicklung einer Definition der menschlichen Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung</i>	64
3.2	<i>Einordnung der menschlichen Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung</i>	66
3.3	<i>Entwicklung eines gemeinsamen Ebenenmodells</i>	67
3.4	<i>Entwicklung einer Multi-Aspekt-Taxonomie</i>	68
3.4.1	Statische Betrachtung	69
3.4.2	Phasenabhängige Betrachtung	69
3.5	<i>Verknüpfung der Taxonomien zu einem integrierten Modell</i>	72
3.6	<i>Entwicklung von Forschungshypothesen für die empirischen Untersuchungen</i>	75
4.	Empirische Untersuchungen	79
4.1	<i>Methodik</i>	79
4.1.1	Entwicklung eines Verfahrens zur Erhebung der menschlichen Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung	79
4.1.2	Vorüberlegungen zur Datenerhebung	80
4.1.3	Zusammenführung zu einem Erhebungsverfahren	81

4.1.4	Experimente unter Laborbedingungen	83
4.1.4.1	Versuchsreihe 1: Einfluss der Menge an verfügbarer Zeit auf das Niveau der menschlichen Zuverlässigkeit	84
4.1.4.1.1	Teilaufgabe „Funktionsstruktur“	85
4.1.4.1.2	Teilaufgabe „Prinzipskizze“	85
4.1.4.1.3	Teilaufgabe „Baustruktur“	86
4.1.4.1.4	Teilaufgabe „3D-Entwurf“	87
4.1.4.1.5	Teilaufgabe „3D_Montage“	87
4.1.4.1.6	Versuchspersonen	88
4.1.4.2	Versuchsreihe 2: Einfluss der Frequenz von Unterbrechungen und der Menge an verfügbarer Zeit auf die menschliche Zuverlässigkeit	89
4.1.4.2.1	Teilaufgabe „Funktionsstruktur“	90
4.1.4.2.2	Teilaufgabe „Funktionsanalyse“	90
4.1.4.2.3	Teilaufgabe „Prinzipskizze“	91
4.1.4.2.4	Teilaufgabe „3D-Entwurf“	92
4.1.4.2.5	Teilaufgabe „3D_Montage“	92
4.1.4.2.6	Durchführung der Unterbrechungen	93
4.1.4.2.7	Versuchspersonen	94
4.2	<i>Ergebnisse</i>	95
4.2.1	Versuchsreihe 1	95
4.2.2	Versuchsreihe 2	105
4.2.3	Detailanalyse der Versuchsdaten mit Hilfe von Bayes-Netzen	116
4.3	<i>Diskussion</i>	123
4.3.1	Menge der verfügbaren Zeit	123
4.3.2	Frequenz der Unterbrechungen	123
4.3.2.1	Einfluss auf das Niveau der menschlichen Zuverlässigkeit	123
4.3.2.2	Erfüllung der als Unterbrechung eingest्रेuten Zweitaufgabe	124
4.3.3	Subjektiv empfundene Beanspruchung	124
4.3.3.1	Zusammenhänge zwischen Belastungsmaßen und Beanspruchungsmaßen	125

4.3.3.2	Frustration	125
4.3.4	Computer-Aided-Design-Software als Arbeitsmittel zum Zeichnen	126
4.3.5	Konstruktionsmethodische Vorgehensweise	126
4.3.6	Gestaltungsempfehlungen	127
4.3.7	Schlussfolgerungen	128
5.	Zusammenfassung und Ausblick	132
5.1	<i>Überführung der Ergebnisse in ein personenzentriertes Simulationsmodell</i>	136
5.2	<i>Ausblick</i>	139
	Literatur	140
	Abbildungsverzeichnis	152
	Tabellenverzeichnis	155