

Hyper Space Exploration

Methodik zur multi-kriteriellen Trade-off-Analyse von Systemen im disruptiven Kontext am Beispiel Elektromobilität

Jörg Holzmann

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
2. Prof. Dr. rer. nat. Herbert Palm

Die Dissertation wurde am 25.01.2017 bei der Universität der Bundeswehr eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 20.04.2017 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 19.05.2017 statt.

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 28

Jörg Holzmann

Hyper Space Exploration

Methodik zur multi-kriteriellen Trade-off-Analyse von Systemen
im disruptiven Kontext am Beispiel Elektromobilität

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5349-4

ISSN 1863-0707

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
1.1	Systementwicklung im disruptiven Kontext	13
1.2	Elektromobilität als disruptive Technologie	16
1.3	Grundsätzliche Lösungsmöglichkeiten	17
2	Stand der Technik und Zielsetzung	21
2.1	Problemstellung aus Systems Engineering Sicht	21
2.2	Model-based Systems Engineering	25
2.3	Untersuchung von Variantenräumen	27
2.3.1	Aufbau und Abdeckung	28
2.3.2	Such-Strategie	30
2.3.3	Surrogat-Modelle	32
2.3.4	Multikriterielle Optimierung	33
2.3.5	Anzahl der Anwendungsfälle	34
2.3.6	Grafische Darstellung der Entscheidungsbasis	35
2.4	Forschungsfrage	37
2.5	Methodischer Aufbau der Arbeit	41
3	Allgemeine methodische und technische Umsetzung	43
3.1	Hyper Space Exploration	43
3.2	Aufspannen des Variantenraums	47
3.3	Erweiterung der Sichtweise	48
3.4	Big Data	50
3.5	Prozess der Meta-Modell-Bildung	52
3.5.1	Surrogat-Modelle	53

3.5.2	Verifikationsgrenzen	57
3.5.3	Meta Trade-off Analyse	60
3.6	Optimierung	62
3.7	Darstellung der Ergebnisse	62
3.7.1	Statische Analysen	62
3.7.2	Korridordarstellung	63
3.7.3	Konvexe Hüllen	66
3.8	Generieren von Expertenwissen	68
4	Anwendung im Automotive-Kontext	71
4.1	Technische Umsetzung	71
4.1.1	Potential von Elektrofahrzeugen	71
4.1.2	Modellhierarchie und Werkzeugkette	73
4.2	Anwendung auf Systemebene	75
4.3	Anwendung auf Modulebene	82
4.3.1	Torque-Vectoring im Rennfahrzeug	82
4.3.2	Zielindikatoren	87
4.3.3	Ergebnisse	92
4.3.4	Optimierung der Modelle	98
5	Diskussion der Ergebnisse	103
6	Zusammenfassung und Ausblick	113

Zusammenfassung

Trade-off Analysen sind wichtige Bausteine des Systementwurfs. Sie unterstützen den Architekten bei der Design-Entscheidung durch systematische Analyse und Vergleich von Alternativen. Ziel ist es, die für den gegebenen Anwendungsfall „beste“ Lösung zu identifizieren. Dadurch lassen sich Kosten und Risiken des Entwurfsprozesses senken. Die in dieser Arbeit beschriebene Hyper Space Exploration (HSE) erweitert bestehende Methoden, sowie zugehörige Optimierungs- und Visualisierungsverfahren, auf die Einsetzbarkeit im disruptiven Kontext. Grundlage ist die Generierung fehlenden Expertenwissens durch den Aufbau von Fachmodellen auf Basis von virtuellem Prototyping. Der Fokus liegt dabei auf dem Einsatz in komplexen, heterogenen Umgebungen. Der hierarchische Aufbau der Methodik ermöglicht die Verwendung auf allen Ebenen des Entwurfsastes im V-Modell. Damit stellt HSE ein leistungsfähiges Werkzeug des modellbasierten Systems Engineering (MBSE) dar. Ein herausragendes Merkmal ist dabei die Fähigkeit, die Hard- und Software-Grenze aufzubrechen. Damit können System-Alternativen analysiert werden, die aus einer direkten Verzahnung beider Elemente bestehen. Mit Hilfe von Design-Parameter-Vektoren wird systematisch ein Raum von virtuellen Varianten aufgebaut. Diese System-Alternativen werden im Kontext eines ebenfalls parametrierbaren Raums der Anwendungsfälle auf Zielindikatoren abgebildet. Hierbei ersetzt ein analytisches Surrogat das komplexe, physikalische Ursprungsmodell. Genetische Algorithmen untersuchen das Surrogat und identifizieren die besten System-Varianten. Güte und Gültigkeit der verwendeten Modelle werden überwacht und über eine eigene Meta Trade-off Analyse optimiert. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt über spezielle, intuitiv verständliche Methoden. Die praktische Umsetzung wird anhand einer eigenen Werkzeugkette für voll-elektrische und Hybride Fahrzeuge beschrieben. Zwei Beispiele aus dem Automotive-Bereich demonstrieren die Funktionsweise der Methodik und der zugehörigen Werkzeugkette auf unterschiedlichen Hierarchieebenen des V-Modells. Auf der Systemebene werden Varianten von vollelektrischen Stadtfahrzeugen mit und ohne schaltbarem Getriebe untersucht und auf ihre Leistungsfähigkeit hin bewertet. Anhand voll-elektrischer Rennfahrzeuge mit Hinter- und Allrad-Antrieb erfolgt eine systematische Analyse des Einflusses von parametrierbaren Regleralgorithmen auf die

Fahrdynamik unter Berücksichtigung eines Raums von Anwendungsfällen. Dieses Beispiel zeigt, wie die HSE gleichrangig auf Hard- und Software-Komponenten angewendet werden kann.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Kosten im Entwicklungsprozess	15
1.2	Bedeutung der Eigenschaftsfrüherkennung	15
1.3	Versuchsfahrzeug der Hochschule München	17
1.4	Rennfahrzeug PWe7.16 der Hochschule München	19
2.1	Grundzüge des V-Modells	23
2.2	Studie dargestellt im V-Modell	24
2.3	Virtuelles Prototyping dargestellt im V-Modell	24
2.4	Problemlösungszyklus	27
2.5	Abdeckung des Designspace	29
2.6	Evolutionärer Zyklus	34
2.7	Spinnennetz oder Kiviat-Diagramm	36
2.8	Darstellung mit parallelen Koordinaten	36
2.9	Kontur-Plot der Funktion nach Formel 2.6	37
2.10	Morphologischer Kasten der möglichen Analyse-Varianten	38
3.1	Studie (links) und virtuelles Prototyping (rechts) zusammengefasst durch die HSE	44
3.2	Die vier Schritte der Hyper Space Exploration	44
3.3	Verbindung von Design-Variablen und Zielindikatoren zu den Modellen	46
3.4	Beispiel für die Abbildung des Design-Space (D) auf den Target-Indicator-Space (T)	47
3.5	Einbeziehung der Parameterräume D , U und Z in die Analyse	50
3.6	Typischer Aufbau des Clusters für die HSE	51

3.7	Ablauf des Surrogat-Bildungsprozesses	52
3.8	Space Filling Design mit Trainings- (o) und Validierungsdaten (+) .	53
3.9	Runge-Phänomen am Beispiel der Funktion $f(x) = \frac{1}{1+x^2}$	55
3.10	Kriging-Surrogat-Modell bei Überschreitung des Trainingsbereiches	58
3.11	Bestimmung der Modell-Verifikations-Grenzen	59
3.12	Meta-Trade-off-Analyse	61
3.13	Beispiel eines Streudiagramms (blau) mit Paretofront (rot)	63
3.14	Beispiel für den Verlauf der oberen und unteren Korridorbegrenzungen	64
3.15	Prinzip der konvexen Hülle	66
3.16	Umhüllung vielgestaltiger Körper durch konvexe Ringe	67
3.17	Modell zur Anwendung von Expertenwissen	69
4.1	Die vier untersuchten Quadranten	72
4.2	Modell-Hierarchie für die Analyse von Elektrofahrzeugen	73
4.3	Werkzeugkette	74
4.4	ΔE , Modell gegen Verifikationsdaten	76
4.5	Histogramm: $RMSE_{Ver}$ gegen Modell-Ordnung	77
4.6	Histogramm der Abweichungen gegen die Verifikationsdaten	78
4.7	Ergebnisse für die 1-Gang-Variante (alle Anforderungen erfüllt: blau; Anforderungen verletzt: schwarz)	78
4.8	Sensitivitäten der Parameter m_F und P_{max} auf den KPI Energie- verbrauch E	79
4.9	Pareto-Darstellung der Ein-/ und Zwei-Gang-Varianten	80
4.10	Darstellung der verwendeten Größen im Einspurmodell	83
4.11	Einflussbereich von Reglern auf das Eigenlenkverhalten	84
4.12	CFD-Simulation des Aero-Pakets in Star-CCM+	85
4.13	Use-Case-Parameter bei der Kreisfahrt	86
4.14	Histogramm einer Rennstrecken-Versuchsfahrt	87
4.15	Stabilitätskriterium nach De Novellis et. al.	87
4.16	Bestimmung des Zielindikators Δa_{ym}	89
4.17	Trajektorienabweichung als Abbruchkriterium	90
4.18	Bestimmung des Zielindikators ΔP_l	91
4.19	Korridor-Darstellung für a_{ym} über ρ	92

Abbildungsverzeichnis

4.20	Korridor a_{ym} über ρ mit optimiertem k	93
4.21	Korridor a_{ym} über ρ mit festem k	94
4.22	Konvexe Hülle eines KPI über dem kompletten UCS	96
4.23	Konvexe Hülle zweier Zielindikatoren	97
4.24	Architekturkonzepte Hinterrad-(RD) vs. Allrad(AWD)-Antrieb	98
4.25	Meta-Trade-off-Analyse des Surrogats	98
4.26	Abweichung Modell/Verifikationsdaten [%] zu Tabelle 4.3	99
4.27	Ergebnisse der Meta-Trade-off-Analyse	100
4.28	Vergleich der Modelle mit Parametern nach Tabelle 4.4	101
4.29	Abweichung Modell/Verifikationsdaten [%] zu Tabelle 4.4	101
5.1	Generische Werkzeugkette für die HSE	104
5.2	Definition von Zielkriterien: links bisher, rechts HSE	109
5.3	Abfolge der Analyse: oben konventionell, unten HSE	110

Tabellenverzeichnis

1.1	Beispiele für disruptive Technologiesprünge	14
2.1	Morphologischen Matrix für ein voll-elektrisches Beispiel-Fahrzeug .	28
3.1	Durch Design-Parameter aufgespannter Variantenraum	45
3.2	Anzahl der Koeffizienten n_k eines Polynoms nach Gleichung 3.11 . .	55
4.1	Designspace des Stadtfahrzeugs	75
4.2	Ergebnisse auf der Paretofront	80
4.3	Parameter zweier Surrogate	99
4.4	Parameter und KPIs der optimalen Modelle	102