

# 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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>13</b>
1.1	Systementwicklung im disruptiven Kontext . . . . .	13
1.2	Elektromobilität als disruptive Technologie . . . . .	16
1.3	Grundsätzliche Lösungsmöglichkeiten . . . . .	17
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und Zielsetzung</b>	<b>21</b>
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
<b>3</b>	<b>Allgemeine methodische und technische Umsetzung</b>	<b>43</b>
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
<b>4</b>	<b>Anwendung im Automotive-Kontext</b>	<b>71</b>
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
<b>5</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>103</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>113</b>

### 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	$\Delta E$ , 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 $\Delta a_{ym}$ . . . . .	89
4.17	Trajektorienabweichung als Abbruchkriterium . . . . .	90
4.18	Bestimmung des Zielindikators $\Delta P_l$ . . . . .	91
4.19	Korridor-Darstellung für $a_{ym}$ über $\rho$ . . . . .	92

## Abbildungsverzeichnis

---

4.20	Korridor $a_{ym}$ über $\rho$ mit optimiertem $k$ . . . . .	93
4.21	Korridor $a_{ym}$ über $\rho$ 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