

DIE ZUKUNFT IM FAHRZEUGENTWURF SYSTEMS-ENGINEERING-BASIERTE OPTIMIERUNG

Eigenschaften und Funktionen eines Pkw lassen sich nach dem Baukastenprinzip beliebig kombinieren. Als Lösung bieten sich Interdisziplinarität und Systems Engineering an. AVL präsentiert anhand der Auslegung eines Stadtfahrzeugs eine multidisziplinäre Werkzeugkette, die beschreibt, wie ein nach Prinzipien des Systems Engineering optimierter Fahrzeugentwicklungsprozess aussehen kann.



AUTOREN



PROF. DR. HERBERT PALM

ist Professor für Systems Engineering an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften München.



MSE JÖRG HOLZMANN

ist Mitarbeiter an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften München.



DR.

STEFAN-ALEXANDER SCHNEIDER

ist Mitarbeiter der Abteilung Process IT Idea to Offer, Funktionale Gestaltung Produkt und Prozess, Numerische Simulation der BMW AG in München.



DR. HANS-MICHAEL KOEGLER

ist Skill and Know-how Manager im Segment Calibration Applications der AVL List GmbH in Graz (Österreich).

ÜBER GRENZEN HINAUS

Ein Fahrzeug ist ein „Gesamtkunstwerk“. Seine Eigenschaften und Funktionen gehen weit über die Summe der einzelnen Bestandteile hinaus, die nach einem Baukastenprinzip miteinander kombiniert werden können. Der interdisziplinäre Ansatz des Systems Engineering greift diese Tatsache auf und stellt einen geeigneten Rahmen zur erfolgreichen Fahrzeugentwicklung bereit. Kundenanforderungen stehen dabei im Zentrum der Produktentwicklung. Die vom Kunden formulierten Anforderungen fließen von Anfang an in den Entwurfsprozess ein. Der Grad ihrer Realisierung bildet über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg das übergeordnete Maß des Fortschritts.

AVL stellt hier anhand einer beispielhaften Aufgabenstellung (Auslegung eines Stadtfahrzeugs) dar, wie ein nach Systems-Engineering-Prinzipien optimierter Fahrzeugentwicklungsprozess aussehen kann. Dieser Prozess ist in der Lage, zwei fundamentale Herausforderungen gleichzeitig zu meistern: die Suche nach der für einen konkreten Anwendungsfall am besten geeigneten Fahrzeugarchitektur und der Nachweis ihrer Funktionalität weit vor dem Bau des Fahrzeugs.

Zur Unterstützung der Methode wird eine neuartige, leistungsfähige Werkzeugkette vorgestellt: Mögliche Fahrzeugarchitekturen werden systematisch aufgebaut; die damit verbundenen Fahrzeugeigenschaften werden in Manövern „erfahrbar“ gemacht; und der zugehörige Zielerreichungsgrad der Kundenanforderungen wird quantifiziert. Der Dialog zwischen Produktmanager und Systemarchitekt zum Zielkonflikt („Trade-off“) von Zielindikatoren gegenüber Designvariationen wird dadurch signifikant verbessert.

VIRTUAL SYSTEM PROTOTYPING IM VIRTUELLEN FAHRVERSUCH

Eine steigende Vielfalt und Komplexität der Fahrzeuge entstehen nicht zuletzt durch Baukastensysteme der Automobilhersteller, die eine Reihe von zum Teil erprobten Alternativen für einzelne Fahrzeugmodule vorhalten. Die Kunst der Entwicklung auf Basis von Baukastensystemen liegt darin, die passenden Module zielführend zu kombinieren. Das

heißt insbesondere, deren Zusammenwirken frühzeitig gegenüber kundenrelevanten Eigenschaften prüfen zu können.

Dem Virtual System Prototyping (VSP), also dem Aufbau eines virtuellen Fahrzeugs auf Systemebene, kommt entsprechend eine Schlüsselrolle zu. Die Methode des VSP setzt eine Integrations-, Simulations- und Testumgebung voraus, die es ermöglicht, (virtuelle) Fahrzeugeigenschaften gegenüber kundenrelevanten Eigenschaften zu bewerten [1]. Die VSP-Methode ist etabliert und markiert den Stand der Technik [2]. Sie erlaubt es, Fahrzeugarchitekturen zu erstellen und bereits vor deren Realisierung zu testen.

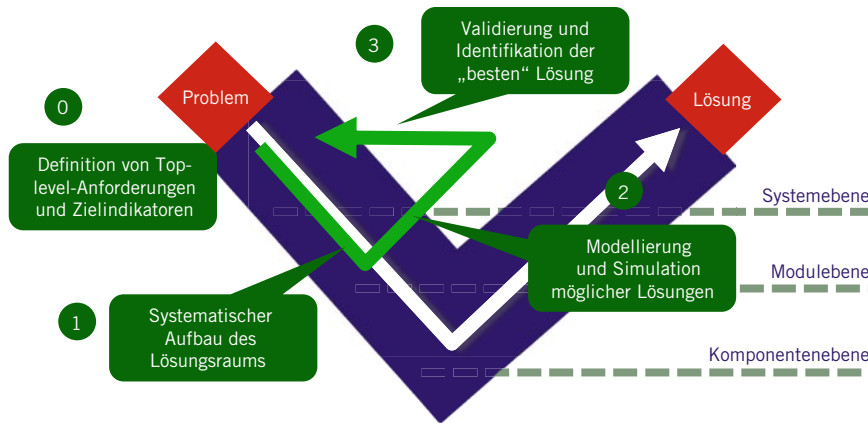
Offen bleibt die Frage, ob eine im VSP untersuchte Architektur für den vom Kunden beabsichtigten Anwendungsfall auch die beste ist. Dafür gab es in der Vergangenheit keine überzeugende Antwort. Genau das ist jedoch möglich, wenn die VSP-Methode mit der Methode der in [2] genauer erläuterten Design Space Evaluation (DSE) ergänzt wird. Diese Kombination wird an einem konkreten Beispiel in den folgenden Abschnitten erläutert.

PRODUKTMANAGER TRIFFT SYSTEMARCHITEKT

Der Produktmanager (PM) ist für den wirtschaftlichen Erfolg eines Fahrzeugs verantwortlich. Er repräsentiert den externen Kunden und ist Auftraggeber der Entwicklung. Vor dem Hintergrund des freien Wettbewerbs muss er Entscheidungen zum „Trade-off“ zwischen Qualität (fahrzeugbezogene Kundenziele), Zeit (der Markteinführung), Kosten (Entwicklung und spätere Fertigung) und den damit verbundenen Risiken treffen. Dazu muss er nicht nur die Kundenziele, sondern auch die Alternativen einer technischen Realisierung und deren Trade-offs kennen.

Für die Architektur des Fahrzeugs ist der Systemarchitekt (SyA) verantwortlich. Er legt das Top-level-Design des Fahrzeugs fest und bricht es auf darunter liegende Design-Ebenen herunter. In unserem Beispiel folgt der SyA dem in [2] beschriebenen Entwicklungsprozess der DSE-basierten VSP-Methode; ❶ zeigt den Entwicklungsprozess im Kontext des V-Modells. Er besteht aus vier Teilschritten:

0. Definition der Top-Level-Anforderungen und Zielindikatoren
1. Systematischer Aufbau des Lösungsraums („Design Space“)



1 Die DSE-basierte VSP-Methode besteht aus vier Teilschritten 0 bis 3

- 2. Modellierung und Simulation möglicher Lösungen
- 3. Identifikation der für den Anwendungsfall am besten geeigneten Lösung.

Konkretisiert wird dies an einem Beispiel: Der PM formuliert die Anforderungen bei der Entwicklung eines zukünftigen Elektroautos (Battery Electric Vehicle, BEV) in der Form: Das Fahrzeug soll :

- : überwiegend im Stadtbetrieb eingesetzt werden
- : kürzere Autobahnfahrten ermöglichen
- : in typischen Stadtszenarien „mithalten“ können
- : eine Mindestreichweite von 200 km besitzen
- : einen möglichst geringen Energiebedarf aufweisen.

Der SyA übersetzt die Anforderungen des PM wie in 2 zusammengefasst in konkret messbare Zielindikatoren. Als „typischen Anwendungsfall“ definiert er die AMS-Runde der Fachzeitschrift „Auto, Motor und Sport“ [3] und legt auf Basis des PMs ein Anforderungsprofil der zu erreichenden Zielwerte fest.

Für einen durchgängigen Entwicklungsprozess können daraus wiederum

Zielwerte für hierarchisch untergeordnete Modul- oder Komponentenanwendungsfälle sowie Testsznarien abgeleitet und auch durchgängig in den unterschiedlichsten Prüfstands Umgebungen (zum Beispiel für Batterie-, Motor- oder Rollenprüfstand) abgebildet werden [4].

Gemäß dem Baukasten verfügbarer Module wendet sich der SyA nun dem Raum möglicher Lösungsarchitekturen (Variantenraum oder „Design Space“) zu. Besitzt der SyA oder seine Arbeitsumgebung bereits ausreichend Erfahrung, so kann die Zielvariante schnell identifiziert werden. Speziell für BEV oder Hybridfahrzeuge ist die Erfahrungsbasis in unserem Beispiel noch nicht ausreichend, um das Potenzial bisher noch unerprobter Varianten ausreichend abschätzen zu können.

Der SyA nutzt daher die DSE-basierte VSP-Methode und baut entsprechend im nächsten Schritt zunächst den Raum möglicher Lösungen systematisch auf. In unserem Beispiel stehen ihm dazu Fahrzeugmodule zur Verfügung, deren Alternativen er durch Variation der in 3 gezeigten Designvariablen adressieren

kann. Auf weitere Alternativen soll hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet werden. Der Variantenraum ist hiermit beschrieben. Doch welche darin ist die „beste“ Lösung?

SYNERGIEPOTENZIALE HEBEN

Der SyA, dem eine VSP-Werkzeugkette zur Verfügung steht, könnte als nächstes zur Suche nach der „besten“ Lösung nach der Brute-Force-Methode Fahrzeugvarianten modellieren und zugehörige Zielindikatoren auf Basis des AMS-Manövers per Simulation bestimmen. Dieser Ansatz ist in der Praxis nicht ziel führend. Die Kombinationsmöglichkeiten steigen exponentiell mit der Anzahl der Designvariablen.

Im konkreten Beispiel nach 3 würden schnell mehrere Hunderttausend Varianten abgeleitet werden und zu einer Rechenzeit von einigen Wochen führen. Die so erzeugte Datenmenge würde den Entscheidungsprozess zwischen PM und SyA kaum erleichtern. Eine Reduktion der Datenpunkte im Variantenraum, zum Beispiel durch DoE-basierte (Design of Experiments) Optimierungsalgorithmen, ist sinnvoll. Die daraus systematisch abgeleiteten Modelle, die einer mathematischen Analyse zuführbar sind, erlauben das Verständnis der Einflüsse und erfordern signifikant weniger Rechenzeit.

4 zeigt das Zusammenspiel der Werkzeugkette: Eine Multi-Domain-Autorenwerkzeugumgebung bildet das Antriebsstrangmodell, das in die Integrationsplattform IPG CarMaker eingebunden wird. Andere Autorenwerkzeuge können über eine standardisierte Schnittstelle (Functional Mock-up Interface, FMI) [5] ebenfalls integriert werden. Die Integrationsumgebung liefert den „virtuellen Fahrversuch“, das heißt ein modular austauschbares 3-D-Gesamtfahrzeug, die Fahrumgebung (Straßen, Verkehr, Umwelt etc.) sowie eine Fahrmanöversprache, die es erlaubt, komplexe Fahraufträge zeiteffizient zu implementieren, zu simulieren und auszuwerten.

Die Fahraufträge werden nach dem DoE-Prinzip in dem Werkzeug Cameo der Firma AVL geplant, gesteuert und auf Basis einer modellbasierten Optimierung [6, 7] ausgewertet. Im Folgenden werden drei durch Cameo unterstützte Arbeitsschritte beschrieben, die vom SyA angewandt werden.

ZIELINDIKATOR	ZIELWERT	BEMERKUNG
v_{MAX}	120 km/h	Bezug: kurze Autobahnstrecken
t_{A50}	≤ 5 s	Zeit für Beschleunigung 0 auf 50 km/h; typische Stadtszenarien
$v_{DURCHSCHNITT}$	Nahe an AMS- „Bestzeit-Geschwindigkeit“	Durchschnittsgeschwindigkeit in der AMS-Runde; typische Stadtszenarien
$v_{STEIGUNG}$	≥ 79 km/h	An definierter Stelle (Steigung) außerhalb der Stadt
REICHWEITE	≥ 200 km	Vom PM gefordert
E_{BEDARF}	≤ 10 kWh/100 km	Bezug: möglichst geringer Kraftstoffverbrauch

2 Zielindikatoren und Zielwerte der vom SyA „übersetzten“ PM-Anforderungen

DESIGNVARIABLEN	VARIATIONSBEREICH	BEMERKUNG
m_{FAHRZEUG}	500 bis 1000 kg	Die Fahrzeugmasse wird unter anderem von der Batteriemasse und dem Einsatz von Leichtbauelementen beeinflusst.
P_{MAX}	18 bis 100 kW	Es stehen E-Motoren unterschiedlicher Leistung zur Verfügung.
ZAHLGÄNGE	1 oder 2	Die Motor-Getriebe-Kopplung kann durch direkten Kraftschluss oder über ein Schaltgetriebe erfolgen.
ÜBERSETZUNG ₁	3,88 oder 6 bis 12	Im Fall von zwei Gängen kann die Getriebeübersetzung des 1. Ganges variiert werden. Für das Ein-Gang-Getriebe und für den 2. Gang im Fall eines Zwei-Gang-Getriebes steht die Übersetzung mit 3,88 für $v_{\text{max}} = 120 \text{ km/h}$ bereits fest.
HOCHSCHALTEN	50 bis 200 rad/s	Die Schaltschwellen im Fall des Zwei-Gang-Getriebes können variiert werden.
RUNTERSCHALTEN	350 bis 450 rad/s	

③ Designvariablen, die den Raum möglicher Lösungen (Top-level-Architektur) beschreiben

VIRTUELLE FLOTTE AUF ERPROBUNG

Der erste Schritt dient der Versuchsplanung und Durchführung. Dabei wird der Variantenraum mithilfe eines Versuchsplans derart abgetastet, dass die interessierenden Ergebnisgrößen im anschließenden Schritt der Modellbildung mathematisch ausreichend genau beschrieben werden können [7]. Die Varianten werden auf dieser Basis durch Cameo gesteuert

in CarMaker simuliert. ⑤ zeigt die aus ③ abgeleitete DoE-Versuchsplanung für alle zu untersuchenden Varianten des Antriebsstrangs. Die sinnvolle Abdeckung im „Design Space“ ist intuitiv erkennbar.

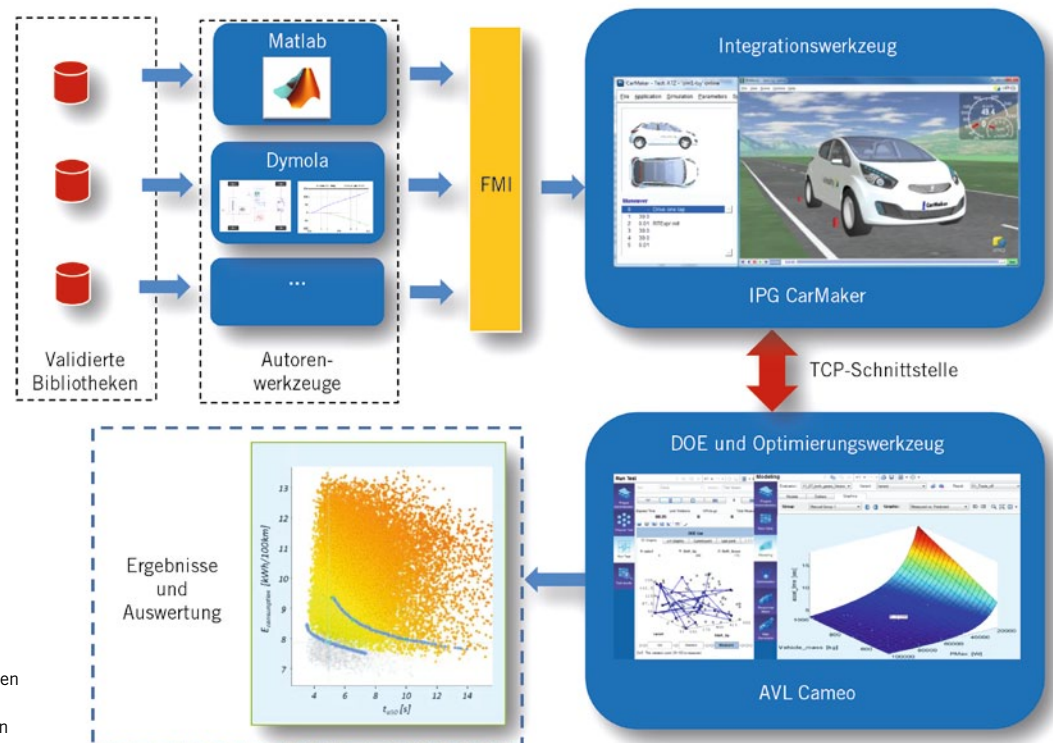
MODELLBASIERTE AUSWERTUNG DER FAHRVERSUCHE

Im Schritt zwei erfolgt die Modellbildung: Aufgrund der Simulationsergeb-

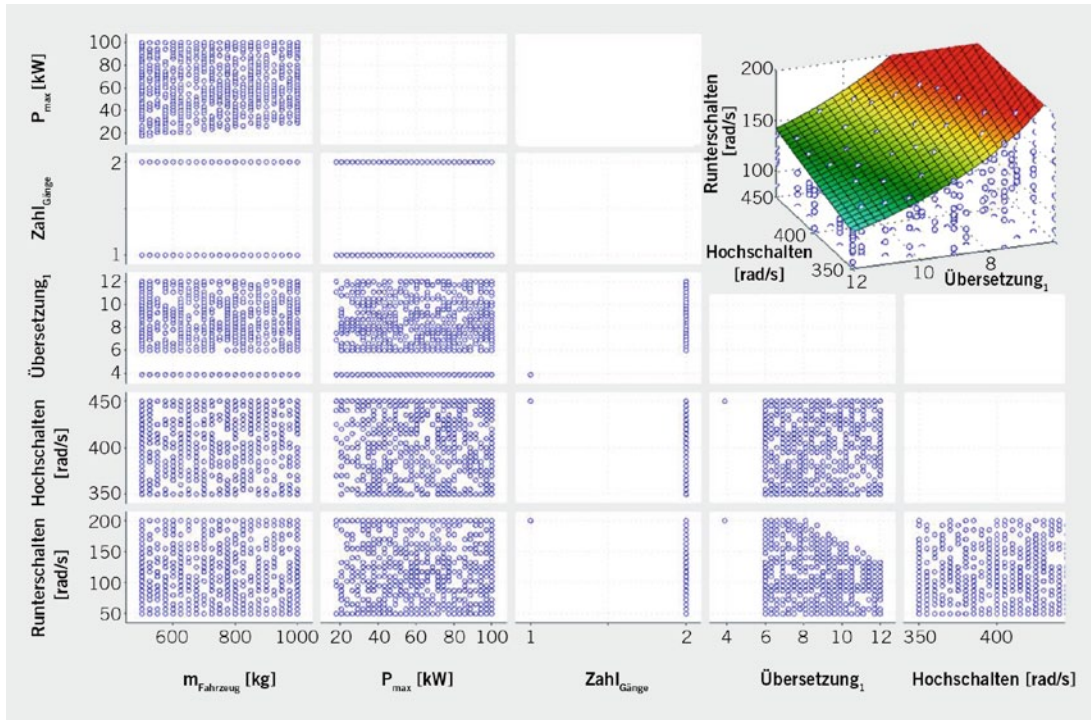
nisse werden für die Zielindikatoren algebraische Modelle abhängig von den Designvariablen gebildet. Eine geeignete Visualisierung führt zu tieferem und doch raschem Verständnis der Zusammenhänge. Die Anzahl von 840 Simulationsrechnungen erlaubt hier eine deutlich verkürzte Rechenzeit gegenüber der Brute-Force-Methode. Die „empirische Modellbildung“ ermöglicht in diesem Fall eine abgesicherte Bewertung aller Varianten des 6-D-Lösungsraums nach ③. Die Güte der Modellbildung wird an Verifikationspunkten geprüft und abgesichert.

PARETO-OPTIMIERUNG

Der letzte dritte Schritt dient der Optimierung: Die Modelle werden von einem Mehrgrößenoptimierungsalgorithmus „befragt“. Mathematisch gesehen handelt sich dabei um eine mehrdimensionale Optimierung unter Nebenbedingungen. Das Optimierungswerkzeug Cameo nutzt dabei einen Algorithmus der auf NSGA-II [8] basiert. Der Anwender erhält die Auswahl optimaler Varianten auf Basis der von ihm formulierten Optimierungsaufgaben. Zusätzlich können die entscheidenden „Stellhebel“ (Designvariablen) in Bezug auf die Zielindikatoren



④ Werkzeugkette zur automatisierten Modellbildung, statistischen Versuchsplanung (DOE), Simulation und Trade-off-Analyse



5 Reduktion der Datenpunkte im Variantenraum entsprechend 3 durch Optimierungsalgorithmen mit Design of Experiments

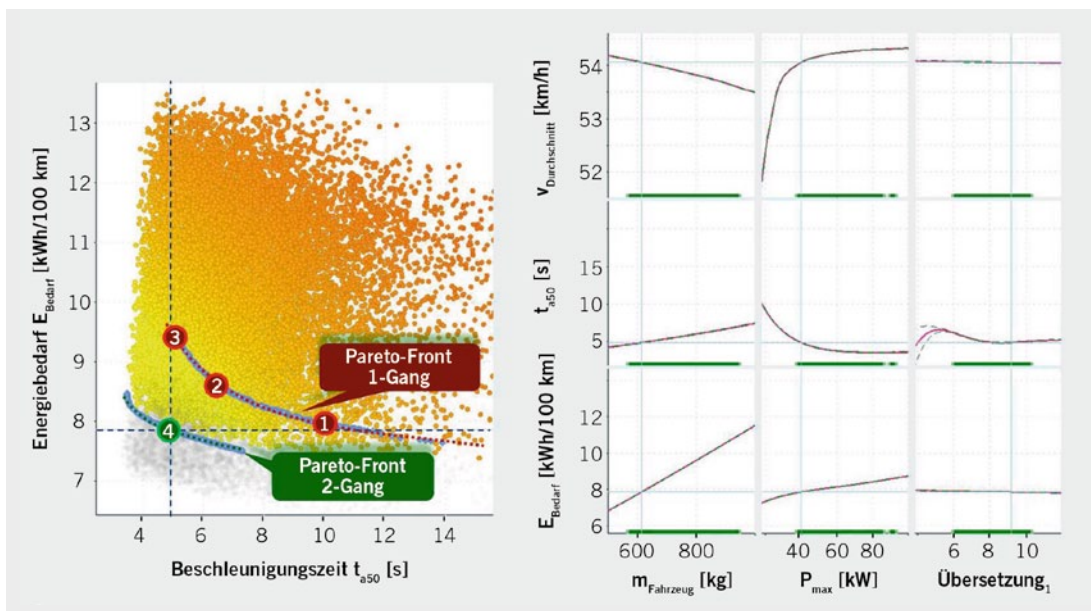
identifiziert, quantifiziert und visualisiert werden.

Ein Blick auf die Ergebnisse zeigt dem SyA in dem Beispiel ein typisches Ergebnis: Die Variante mit minimalem Energiebedarf ist nicht gleichzeitig die Variante mit dem besten Beschleunigungsverhalten; die Variante mit bestem Verkehrsflussverhalten ist nicht die Variante mit maximaler Reichweite und so

weiter. Mit anderen Worten: Die Auswahl der „besten“ Variante ist eine Trade-off-Entscheidung. Wie können die Ergebnisse der Testfahrten so aufbereitet werden, dass sie eine zielführende Diskussion zwischen PM und SyA unterstützen?

Die Frage beschreibt eine Optimierungsaufgabe mit mehreren (n) Zielen. Nehmen wir als Beispiel den Trade-off zwischen Beschleunigungsverhalten und

Energiebedarf (n = 2). Die sogenannte Pareto-Front bestimmt diejenige n-1 = 1 dimensionale Hyperfläche, bei der eine Verbesserung eines Zielfunktionswerts nur durch Verschlechterung eines anderen erreicht werden kann. Das Optimierungswerkzeug kann diese für die multivariate Optimierung so wichtigen Flächen berechnen, visualisieren und so einer Diskussion von PM und SyA zugänglich



6 Vier Pareto-optimale Positionen im Raum der Zielindikatoren und deren Positionen im Variantenraum

lich machen. ⑥ zeigt Diagramme zur Pareto-Front sowie den Trade-off-Analysen:

: Links ist die Trade-off-Darstellung der unabhängigen Ziele illustriert: In Gelb die „Wolke“ möglicher Zielwerte für den Energiebedarf E_{Bedarf} über der zugehörigen Zeit t_{a50} . Der ausgegraute Bereich erfüllt nicht alle Randbedingungen gleichzeitig. In blau sieht man die beiden Paretofronten für das Ein- und das Zwei-Gang-Getriebe.

: Je nach der Position im linken Teil von ⑥ – hier für den Punkt 4 – zeigt die rechte Grafik die Position im Modellschnitt. Das Werkzeug unterstützt die Auswahl der Modellvariante interaktiv. Im Beispiel sind nur Abhängigkeiten von den drei stark beeinflussenden Designvariablen Fahrzeugmasse m_{Fahrzeug} , Motorleistung P_{max} sowie das Übersetzungsverhältnis Übersetzung, für den ersten Gang dargestellt. Letzteres ist nur für das Zwei-Gang-Getriebe ein freier Parameter und liegt für die Ein-Gang-Varianten fest bei 3,88.

Der Optimierungsalgorithmus reduziert mit den gewählten Einschränkungen der zu optimierenden Zielwerte den Variantenraum möglicher Lösungen auf vier repräsentative Alternativen und deren Trade-offs. Sie sind in ⑦ gelistet. Dem Aufwand einer Zwei-Gang-Variante stehen die Vorteile einer geringeren benötigten Motorleistung bei signifikant besserem Energiebedarf und Beschleunigungsverhalten gegenüber. DSE-basiertes VSP erlaubt die Quantifizierung dieser Trade-offs. Eine quantitative Basis zur Designentscheidung „Architektur mit oder ohne Schaltgetriebe“ steht zur Verfügung. Die Parameter der Schaltschwellenfestlegung haben sich als wenig einflussreich erwiesen und müssen entsprechend nicht vertieft betrachtet werden. Das spart Zeit und erlaubt, den Fokus auf die wesentlichen Themen zu legen.

ZUSAMMENFASSUNG

Rund um die Themen Entwicklungsmethodik, Baukastensystem und Systems Engineering gibt AVL hier Antworten auf folgende Fragen, die im Entwicklungsprozess auftreten können:

- : Wie können schon in der Konzept- und Entwurfsphase Designentscheidungen systematisch gegenüber kundenrelevanten Eigenschaften bewertet werden?
- : Wie lässt sich der Raum möglicher Architekturvarianten systematisch auf-

	DESIGNVARIABLEN			ZIELINDIKATOREN	
NR.	P_{max} [kW]	Zahl _{Gänge} [-]	m_{Fahrzeug} [kg]	t_{a50} [s]	E_{Bedarf} [kWh/100 km]
1	40	1	616	10,06	7,97
2	65	1	625	6,73	8,50
3	100	1	640	5,12	9,40
4	40	2	612	4,89	7,86

⑦ Die vier Pareto-optimalen Ergebnisse aus ⑥

bauen und zielgerichtet die für einen Anwendungsfall „beste Lösung“ finden?

- : Wie lässt sich der beschriebene Entwurfsprozess durch geeignete Werkzeuge unterstützen und wo möglich automatisieren?
- : Wie lassen sich die qualitätsentscheidenden Informationen effizient und quantitativ belastbar für Architekturentscheidungen extrahieren?

Die Methode aus [2] erweitert die VSP-Technik (Virtual System Prototyping) durch den Ansatz der Design Space Evaluation (DSE). Die vorgestellten Arbeitsschritte orientieren sich am „Fahrversuch“ als zentraler Instanz in Kombination mit einem aus Designvariablen systematisch aufgebauten Variantenraum. Der Einsatz von DoE erlaubt eine hochgradig effiziente Arbeitsweise. Die Ergebnisse stellen die Zusammenarbeit zwischen Produktmanagern und Systemarchitekten auf eine neue Qualitätsstufe: Die für einen Anwendungsfall am besten geeignete Alternative wird im Trade-off kunden-orientierter Zielindikatoren treffsicher im Raum möglicher Lösungen identifiziert. Ein teilweise gefühlbasierter Entscheidungsprozess wird durch quantifizierte Zusammenhänge neutraler, zielgerichteter und effektiver. Die Funktionalität der gewählten Lösung wird weit vor einer fahrzeugtechnischen Realisierung nachgewiesen.

Zur erfolgreichen Anwendung der Methode in einem durchgängigen Fahrzeugentwicklungsprozess werden validierte Modelle der Einzelkomponenten mit hinreichender Genauigkeit, ein validierter Fahrmanöverkatalog sowie eine durchgängige Toolkette eingesetzt. Die vorgeschlagene Toolkette unterstützt folgende Aktionen:

- : Integration der Einzelkomponenten zum Gesamtfahrzeugmodell
- : Simulation der Fahrmanöver
- : statistische Versuchsplanung und automatisierte Durchführung

: modellbasierte Auswertung Trade-off-Analyse.

Der Einsatz der Methode stellt für einen Automobilhersteller im Umfeld innovativer Fahrzeugentwicklungen einen signifikanten Wettbewerbsvorteil dar.

LITERATURHINWEISE

- [1] Schneider, S.-A.; Schick, B.; Palm, H.: Virtualization, Integration and Simulation in the Context of Vehicle Systems Engineering. Vortrag, Embedded World, Nürnberg, Februar 2012
- [2] Palm, H.; Holzmann, J.; Klein, R.; Schneider, S.-A.; Gerling, D.: A Novel Approach on Virtual Systems Prototyping Based on a Validated, Hierarchical, Modular Library. Embedded World, Nürnberg, Februar 2013
- [3] Bangemann, C.: Rollenspiele. In: AMS Auto, Motor, Sport (2007), Nr. 22, S. 180 – 182
- [4] Voigt, K. U.; Denger, D.; Conrad, M.: Durchgängig, integriert und einfach? – Entwicklungsumgebungen für moderne Antriebsstränge. Vortrag, SimVec, Baden-Baden, März 2012
- [5] FMI – The Functional Mock-up Interface. <http://www.functional-mockup-interface.org/> vom 26. Februar 2013
- [6] Castagna, E.; Biondo, M.; Cottrell, J.; Altenstrasser, H.; Beidl, C.; Koegeler, H.-M.; Schuch, N.: Tier-3-Motorabstimmung für unterschiedliche Fahrzeugvarianten mit globalen Modellen. In: MTZ 68 (2007), Nr. 6, S. 472 – 479
- [7] Beidl, C.; Koegeler, H.-M.: Beherrschung komplexer Entwicklungsprozesse. Kapitel 13. In: Merker, G.; Schwarz, C.; Teichmann, R. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren. 6. Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer, 2012
- [8] Deb, K.; Agrawal, S.; Pratap, A.; Meyarivan, T.: A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II. NSGA-II Lecture Notes in Computer Science, 1917/2000, S. 849 – 858, ISSN 0302-9743 (2000)



DOWNLOAD DES BEITRAGS

www.springerprofessional.de/ATZ



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

order your test issue now:

springervieweg-service@springer.com