

DISS. ETH NO. 22990

**Constraint-Based Methods for Automated Computational
Design Synthesis of Solution Spaces**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

CLEMENS HEINZ WOLFGANG MÜNZER

Diplom-Ingenieur Univ., Technische Universität München

born on 07.05.1985

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Kristina Shea
Prof. Dr. Petros Koumoutsakos

2015

Abstract

Computers have the capability to support human designers in a variety of tasks. This includes not only releasing the human designer from routine tasks by design automation but also sparking and supporting innovation and creativity in development processes. In order to support the concept phase effectively, a wide range of possible concepts, which are quantitatively evaluated, should be considered to enable designers to explore the solution space and to make advantageous decisions towards concepts to be considered in consecutive development phases. To enable an automated systematic solution space exploration and evaluation, this research presents different approaches based on a graph-based object-oriented knowledge representation. This representation is combined with first-order logic and Boolean satisfiability as foundation for a generic automated approach for requirement-driven computational design synthesis of solution spaces. To enable the evaluation of the generated solution spaces, a generic approach to automatically translate the generated graph-based product concepts into Bond graph-based simulation models is described. Finally, a method is presented to parametrically optimize the generated concepts using simulated annealing. Here, parameterizations are generated by automatically setting up and solving constraint satisfaction problems and evaluated using the generated simulation models. The methods are validated on the case studies of chemical process engineering, automotive powertrains and 3D-Printer kinematic mechanisms. The main contributions of this research are a continuous and generic approach starting with task definitions and ending with a valid, parameterized product concept, a method which is able to determine if an engineering task is solvable for a given set of synthesis building blocks, and an approach for a generic transformation of the generated product concepts to Bond graph-based simulation models. Thus, this research provides new knowledge in terms of generic transformations between different knowledge representations in order to generate, explore and evaluate large solution spaces with an, until now, unreached expressiveness.

Zusammenfassung

Die fortschreitende Entwicklung von Computern ermöglicht die Unterstützung von Entwicklern bei vielerlei Aufgaben. Diese Unterstützung erlaubt nicht nur, durch Automatisierung, Routineaufgaben des Entwicklers zu übernehmen, sondern kann auch Innovation und Kreativität in Entwicklungsprozessen fördern. Um die Phase des Konzipierens effektiv zu unterstützen muss eine grosse Anzahl von möglichen Konzepten erzeugt und bewertet werden um dem Entwickler eine Beurteilung des Lösungsraumes zu ermöglichen und ihn oder sie damit zu guten Entscheidungen zugunsten eines oder mehrerer Konzepte zu befähigen, die in den folgenden Phasen ausgearbeitet werden. Um eine systematische automatisierte Erschliessung von Lösungsräumen zu ermöglichen präsentiert die vorliegende Arbeit einen dreiteiligen Ansatz der auf einer graphbasierten objektorientierten Wissensrepräsentation aufbaut. Im ersten Teil wird diese Wissensrepräsentation genutzt um mit Hilfe von Prädikatenlogik und boolescher Logik eine generische automatisierte Erzeugung von Konzepttopologien im Lösungsraum zu ermöglichen. Für jede erzeugte Konzepttopologie wird, im zweiten Teil des Ansatzes, ein Constraint Satisfaction Problem erstellt und gelöst um, wenn möglich, auf der Grundlage von Anforderungen und kritischen Betriebspunkten mögliche Parametrisierungen des Konzepts zu erzeugen. Im dritten Teil des Ansatzes wird die optimale Parametrisierung jedes erzeugten Konzeptes mit Hilfe der Optimierungsmethode Simulated Annealing ermittelt. Dazu wird automatisiert für jedes Konzept ein Simulationsmodell in Form eines Bondgraphen generiert und für verschiedene Parametrisierungen ausgewertet. Um den Ansatz zu validieren werden verschiedene Fallstudien betrachtet: ein Beispiel aus der chemischen Verfahrenstechnik, zwei Beispiele zur Entwicklung automobiler Antriebsstränge und ein Beispiel zur Entwicklung von Mechaniken zum Antrieb von Druckköpfen in 3D-Druckern. Der Hauptbeitrag der präsentierten Forschung ist ein kontinuierlicher generischer Ansatz der, ausgehend von einer formal definierten Entwicklungsaufgabe, parametrisierte Produktkonzepte erzeugt und bewertet. In diesem Prozess kann, für einen endlichen Satz an möglichen Bausteinen für die Konzeptsynthese, die Lösbarkeit der Entwicklungsaufgabe untersucht werden. Ausserdem wird ein generischer Ansatz präsentiert der die erzeugten Konzepttopologien in simulierbare Bondgraphen übersetzt. Somit erweitert diese Forschungsarbeit den Stand der Technik mit neuen Ansätzen zu generischen Modell- und Repräsentationstransformationen und ermöglicht so grosse Lösungsräume zu erschliessen und, mit bis dato unerreichtem Informationsgehalt, zu bewerten.