

# **Konzeption eines Frameworks für Digitale Zwillinge zur Systemidentifikation und Verhaltenssimulation von Ingenieursystemen**

**Conception of a framework for Digital Twins for system identification and  
behavior simulation of engineering systems**

An der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität  
Dresden zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

**DISSERTATION**

vorgelegt von

Dipl.-Medieninf. Michael Polter  
geboren am 10. November 1984 in Rostock

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Raimar J. Scherer  
(Technische Universität Dresden)

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Jörn Plönnings  
(Universität Rostock)

Dritter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl  
(Technische Universität Darmstadt)

Tag der Einreichung: 21. September 2023

Tag der Verteidigung: 24. April 2024

# Kurzfassung

Beim Entwurf von Bauwerken herrschen nach wie vor große Modellunsicherheiten aufgrund von Unterbemessungen. Trotz der Anwendung hoher Sicherheitsfaktoren wird die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen an Bauwerke wegen steigender Sicherheitsbedürfnisse der Gesellschaft und daraus resultierender Vorschriften immer aufwändiger. Eine Reduktion der Sicherheitsfaktoren und damit materielle und zeitliche Einsparungen bei Bauwerken sowie Konstruktions- und Überwachungsprozessen erfordert neue Methoden für eine zuverlässigere Vorhersage des Bauwerksverhaltens. Das seit Langem bekannte Verfahren der Systemidentifikation durch Parameterstudien ist hierbei aufgrund fehlender Werkzeugunterstützung und daraus resultierendem hohen manuellen Aufwand bisher nicht geeignet, um ein hinreichend genaues Ergebnis zur Reduktion der Sicherheitsfaktoren bei gleichbleibendem nachweisbarem Sicherheitsniveau zu liefern.

Die hier entwickelte Automatisierung des Prozesses der neuartigen simulationsbasierten Systemidentifikation ermöglicht die Durchführung von Parameterstudien mit einer ausreichend großen Anzahl von Modellvarianten, um realitätsnahe Systeme für hinreichend genaue Verhaltensvorhersagen bereitzustellen. Für die simulationsbasierte Systemidentifikation wird ein neues generisches Software-gestütztes Prozessmodell konzipiert, das an wechselnde Anforderungen adaptiert und in komplexe Optimierungsverfahren integriert werden kann. Die Simulations- und Hilfsprozesse sind in Building Information Modeling (BIM) eingebettet, wobei mit Hilfe der Multimodellmethode ein gemeinsamer Datenraum für einen komplexen Digital Twin (DT) geschaffen wird.

Als Basisarchitekturkonzept für die Umsetzung des entwickelten Prozessmodells im Rahmen eines DT dient das integrated Virtual Engineering Laboratory (iVEL). Dieses definiert Merkmale sowie Anforderungen für die konkrete Umsetzung eines integrierten DT in einer Software-Plattform. Zur Maximierung der Adaptierbarkeit bei der Erstellung bzw. Anpassung iVEL-basierter DT an unterschiedliche Aufgabenstellungen wird das BIMgrid-Framework entwickelt und in Java formalisiert. Dieses kapselt elementare Funktionen in Services, die anwendungsfallspezifisch zur Lösung komplexer Aufgaben kombiniert und durch Workflows gesteuert werden. Im Mittelpunkt stehen dabei die Erforschung einer grundlegenden Prozessinfrastruktur zur automatisierten Durchführung simulationsbasierter Systemidentifikationen, eine BIM-basierte Datenverwaltung auf der Grundlage von Multimodellen sowie die Anwendung moderner Web-Prinzipien zur Unterstützung kollaborativer Projekt-Teams. Eine Referenzimplementierung des Frameworks demonstriert die Umsetzbarkeit des Konzeptes und dient als Ausgangspunkt zur Implementierung eigener iVEL-basierter DT.

# Abstract

When designing buildings, there are still major model uncertainties because of under-sizing. Despite the application of high safety factors, meeting security requirements for buildings is becoming more and more difficult due to the increasing security needs of society and the resulting regulations. A reduction in safety factors and therefore material and time savings in buildings, as well as construction and monitoring processes requires new methods for more reliable prediction of structural behavior. The method of system identification through parameter studies, which has been known for a long time, was not suitable for a sufficiently accurate result due to the lack of tool support and the resulting high manual effort to reduce the safety factors while maintaining the same verifiable safety level.

Automating the process of the novel simulation-based system identification enables parametric studies to be performed with a large enough number of model variants to provide realistic systems for sufficiently accurate behavioral predictions. A software-supported process model is created for the simulation-based system identification, which can be adapted to changing requirements and integrated into complex optimization processes. The simulation and auxiliary processes are embedded in BIM, whereby a common data space for a complex DT is created with the help of the multimodel method.

The iVEL serves as a basic architectural concept for the implementation of the developed process model as part of a DT. It defines features and requirements for the concrete implementation of an integrated DT in a software platform. In order to maximize adaptability when creating or adapting iVEL-based DT to different application scenarios, the BIMgrid framework is developed and formalized in Java. Elementary functions are encapsulated in services, which are combined in a specific application to solve complex tasks and which are controlled by workflows. The focus is on researching a basic process infrastructure for the automated execution of simulation-based system identifications, BIM-based data management based on multimodels and the application of modern web principles to support collaborative project teams. A reference implementation of the framework demonstrates the feasibility of the concept and serves as a starting point for implementing your own iVEL-based DT.