M. Sebastian Haag

Generierung topologieinvarianter Geometrierepräsentationen für Digitale Zwillinge

SHAKER VERLAG

Generierung topologieinvarianter Geometrierepräsentationen für Digitale Zwillinge

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

M. Sebastian Haag, M.Sc.

aus Frankfurt am Main

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer
Tag der Einreichung:	11.04.2019
Tag der mündlichen Prüfung:	18.06.2019

Darmstadt 2019

D17

Forschungsberichte aus dem Fachgebiet
Datenverarbeitung in der Konstruktion

Band 64

M. Sebastian Haag

Generierung topologieinvarianter Geometrie-repräsentationen für Digitale Zwillinge

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6972-3
ISSN 1435-1129

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Lass sie denken es sei Zufall gewesen.

Vorwort des Herausgebers

Die moderne Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) bietet vielfältige Innovations- und Leistungspotentiale, die im Entstehungsprozess neuer Produkte auszuschöpfen sind. Dies setzt jedoch voraus, dass die wissenschaftlichen Grundlagen zum Einsatz der modernen IKT in der Produktentstehung vorliegen und neue Methoden wissenschaftlich abgesichert sind. Darüber hinaus stellen die wissenschaftliche Durchdringung und die Bereitstellung wissenschaftlicher Forschungsergebnisse eine abgestimmte Kooperation zwischen Forschung und Industrie dar.

Vor diesem Hintergrund informiert diese Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Fachgebiets Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) des Fachbereichs Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt.

Ziel der Forschungsarbeiten ist die wissenschaftliche Durchdringung innovativer, interdisziplinärer und integrierter Produktentstehungsprozesse und darauf aufbauend die Konzeption neuer Methoden für die Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Herstellung neuer Produkte.

Der Digitale Zwilling ist eine digitale Darstellung eines physischen Objekts, insbesondere von in der Realität hergestellten Einzelteilen, Baugruppen und Produkten. Er stellt die konsequente Anwendung modellbasierter Verfahren über den gesamten Produktlebenszyklus dar und gewinnt für die Digitalisierung der Industrie zunehmend an Bedeutung. Auch wenn der Digitale Zwilling noch Grundlagenforschung benötigt, ist seine Bedeutung für die Industrie sehr deutlich geworden, da die Technologie des Digitalen Zwillings ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Professionalisierung von cyber-physischen Systemen ist. Der grundlegende Forschungsansatz besteht darin, eine digitale Darstellung mit möglichst vielen Eigenschaften zu spezifizieren, um eine realitätsnahe Objektrepräsentation zu ermöglichen. Eine Grundlage für die Spezifikation Digitaler Zwillinge bildet die STEP-Technologie. Der Grundgedanke für die Verwendung der STEP-Technologie als Grundlage für die Spezifikation Digitaler Zwillinge ist die umfassende Produktmodellspezifikation, die in den wichtigsten Product Lifecycle Management Systemen implementiert wurde. Somit wird STEP auch als gemeinsame Technologie zur Integration von PLM- und Industrie 4.0-Technologie anerkannt.

Herr Haag nimmt sich diesem Ansatz anhand der vorliegenden Dissertation an und entwickelt eine Methode, mit der geometrische Zwillinge von Einzelteilen erzeugt werden können, um die Realitätsnähe der Objektrepräsentation durch Digitale Zwillinge zu erhöhen. Das entwickelte Verfahren vereint dreidimensionale geometrische Bauteilrepräsentationen aus der Konstruktion mit realen Messungen aus der Qualitätsprüfung, um digitale Repräsentationen der Ist-Geometrie zu erzeugen. Die Generierung basiert auf dem STEP-Datenmodell und erfolgt automatisiert mit Hilfe von Operationsalgorithmen. Die Methode stellt hochgenaue geometrische Repräsentationen realer Bauteile für die Produktnutzungsphase zur Verfügung. Seine Dissertation liefert damit einen wichtigen Beitrag zur Erweiterung der modellbasierten Rechnerunterstützung über die Produktentstehung hinaus.

Darmstadt, September 2019 Reiner Anderl

Vorwort des Autors

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) im Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl, Leiter des Fachgebiets DiK. Seine wertvollen Anregungen, die fachlichen Diskussionen sowie die Bereitstellung von wissenschaftlichen Freiräumen haben zur Entstehung und Fertigstellung dieser Dissertation beigetragen. Dank seiner wohlwollenden Förderung konnte ich wertvolle wissenschaftliche und industrielle Erfahrungen sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene sammeln.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer, Leiter des Fachgebiets Produktsicherheit an der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik an der Bergischen Universität Wuppertal danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferats und den kollegialen Austausch.

Ich bedanke mich bei meinen ehemaligen Kollegen und Nussaffen Alexander Arndt, Felix Heimrich und Oleg Anokhin für die gemeinsame und stets kurzweilige Zeit am DiK. Besonderer Dank gilt meinem langjährigen Bürokollegen und Freund Oleg Anokhin für die unzähligen, vielfach hitzigen fachlichen Diskussionen inner- und außerhalb unseres Büros, die die Stichhaltigkeit dieser Dissertation stets auf die Probe gestellt haben.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Frau Melina Lutwitzi, der allerbesten Hiwine, die sich ein wissenschaftlicher Mitarbeiter wünschen kann. Ihre langjährige Treue und außerordentliches Engagement haben ebenfalls maßgeblich zum Erfolg dieser Dissertation beigetragen.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mich nicht erst während der Anfertigung dieser Dissertation, sondern bereits mein Leben lang fördern und fordern.

Frankfurt am Main, September 2019 M. Sebastian Haag

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers ..... **I**

Vorwort des Autors ..... **III**

Inhaltsverzeichnis ..... **V**

Abbildungsverzeichnis ..... **VII**

Tabellenverzeichnis ..... **IX**

Abkürzungsverzeichnis ..... **X**

Symbolverzeichnis ..... **XII**

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation und Problemstellung 2

1.2 Zielsetzung 4

1.3 Aufbau der Dissertation 4

2 Grundlagen und Stand der Technik **7**

2.1 Virtuelle Produktentwicklung 7

2.1.1 Grundlagen rechnerinterner Geometriemodelle 11

2.1.2 Volumenmodelle 16

2.1.3 CAx-Prozessketten 19

2.2 Fertigungsmesstechnik 21

2.3 ISO 10303 24

2.3.1 Aufbau der ISO 10303 25

2.3.2 Geometrische und topologische Repräsentation 27

2.3.3 Aufbau einer STEP-Datei 30

2.4 Digitaler Zwilling 32

2.4.1 Definitionen des Digitalen Zwillings 36

2.4.2 Chancen des Digitalen Zwillings 38

2.4.3 Herausforderungen des Digitalen Zwillings 41

2.5 Fazit 43

3 Handlungsbedarf und Anforderungsprofil **45**

3.1 Handlungsbedarf 45

3.2 Zieldefinition 47

3.3 Betrachtete Anwendungsfälle ... 50
3.3.1 Erstgenerierung ... 50
3.3.2 Laufzeitgenerierung ... 53
3.4 Anforderungen ... 55
3.4.1 Allgemeine Anforderungen an das Konzept ... 55
3.4.2 Anforderungen an die Methode ... 56
3.4.3 Anforderungen an das Anwendungssystem ... 58
3.4.4 Zusammenfassung der Anforderungen und Fazit ... 61

4 Konzept zur Generierung topologieinvarianter Geometrierepräsentationen ... 65
4.1 Definitionen ... 66
4.2 Konzeptüberblick ... 70
4.3 Methode zur Generierung topologieinvarianter Geometrierepräsentationen ... 72
4.3.1 Analyse ausgewählter Geometrieelemente ... 72
4.3.2 Aufstellung der Elementoperationen ... 86
4.3.3 Entwicklung der Operationsalgorithmen ... 87
4.4 Zusammenfassung der Methode ... 109

5 Prototypische Implementierung ... 111
5.1 Architektur des Anwendungssystems und Auswahl der IT-Werkzeuge ... 111
5.2 Funktion des Anwendungssystems ... 113
5.2.1 Mustererstellung ... 113
5.2.2 Manuelle Generierung von Instanzen ... 116
5.2.3 Vollautomatisierte Generierung von Instanzen ... 117

6 Validierung ... 119
6.1 Zur Validierung genutztes repräsentatives Beispiel ... 119
6.2 Durchführung der Validierung ... 120
6.3 Fazit ... 126

7 Ausblick ... 129

8 Zusammenfassung ... 131

Literaturverzeichnis ... 135

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Phasen des Produktlebenszyklus aus informationstechnischer Sicht 9
Abbildung 2.2: Topologie und Geometrie von Körpern [25] 14
Abbildung 2.3: Generative Volumenmodelle [10] 17
Abbildung 2.4: Akkumulative Volumenmodelle [10] 18
Abbildung 2.5: Hybride Volumenmodelle [10] 19
Abbildung 2.6: Prüf- und Messaufgaben innerhalb der Fertigungsmesstechnik nach [111] 22
Abbildung 2.7: Arten von Messabweichungen nach [111] 23
Abbildung 2.8: Struktur der ISO 10303 nach [82] 25
Abbildung 2.9: Geometrieschema komplett nach [108] 28
Abbildung 2.10: Topologieschema nach [108] 29
Abbildung 2.11: Geometriemodellschema nach [108] 30
Abbildung 2.12: Beschreibung von Kreisen in *EXPRESS* und Abbildung auf eine sequentielle Datei nach [13] 31
Abbildung 3.1: Ausgangssituation, Zieldefinition, gewählter und alternative Lösungswege 48
Abbildung 3.2: Anwendungsfalldiagramm: Szenario 1 – Erstgenerierung 52
Abbildung 3.3: Anwendungsfalldiagram: Szenario 2 - Laufzeitgenerierung 54
Abbildung 4.1: Graphische Darstellung der allgemeinen Definition des Digitalen Zwillings (links). Eingrenzung der Betrachtung auf den Geometriezwilling (rechts). 67
Abbildung 4.2: Generierung von Bauteil- und Geometriezwillinginstanzen 68
Abbildung 4.3: Multiplizität von Bauteil- (BTI) und Geometriezwillinginstanzen (GZI) 69
Abbildung 4.4: Konzeptüberblick 71
Abbildung 4.5: Topologisch-geometrische Struktur eines Punktes. 74
Abbildung 4.6: Topologisch-geometrische Struktur einer Strecke 75
Abbildung 4.7: Topologisch-geometrische Struktur einer Polygonfläche mit n Seiten 77
Abbildung 4.8: Topologisch-geometrische Struktur einer Kreisfläche 78
Abbildung 4.9: Topologisch-geometrische Struktur eines Quaders 79
Abbildung 4.10: Topologisch-geometrische Struktur eines Zylinders 80
Abbildung 4.11: Topologisch-geometrische Struktur einer Kugel 82
Abbildung 4.12: Topologisch-geometrische Struktur eines Kegels 83
Abbildung 4.13: Topologisch-geometrische Struktur eines Torus 84
Abbildung 4.14: Aufstellung der Geometrieelemente und Operationen 86
Abbildung 4.15: Veranschaulichung der Navigation durch die STEP-Datenstruktur 88
Abbildung 4.16: Zuordnung der Operationsalgorithmen zu den Elementoperationen 109

Abbildung 4.17. Übersicht der Hilfsalgorithmen 110
Abbildung 5.1: Architektur der Softwareapplikation *GEMINI* 112
Abbildung 5.2: *GEMINI* Benutzerschnittstelle – Startbildschirm 114
Abbildung 5.3: *GEMINI* Benutzerschnittstelle – Mustererstellung 115
Abbildung 5.4: *GEMINI* Benutzerschnittstelle – Instanzgenerierung 117
Abbildung 6.1: Pneumatikzylinderboden mit Nennmaßen und Toleranzen..... 119
Abbildung 6.2: Mustererstellung des Pneumatikzylinderbodens 121
Abbildung 6.3: Instanzgenerierung des Pneumatikzylinderbodens..... 122
Abbildung 6.4: Pneumatikzylinderboden nach Generierung mit Annotationen 125

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung topologischer und geometrischer Elemente.....16
Tabelle 3.1: Anforderungsprofil an die Generierung topologieinvarianter Geometriepräsentationen für Digitale Zwillinge (fortlaufend)...61

Abkürzungsverzeichnis

0D .....nulldimensional

1D .....eindimensional

2D .....zweidimensional

3D .....dreidimensional

AP .....Anwendungsprotokoll / Application Protocol

ASCII.....American Standard Code for Information Interchange

B-Rep .....Boundary Representation

CAD .....Computer Aided Design

CAE.....Computer Aided Engineering

CAM.....Computer Aided Manufacturing

CAx .....Computer Aided x

CFD.....Computational Fluid Dynamics

CiP .....Center für industrielle Produktivität

CPS .....Cyber-physisches System

CSG.....Constructive Solid Geometry

deu.....deutsch

DIN .....Deutsches Institut für Normung

EN.....Europäische Norm

engl.....englisch

F.....Festforderung

FEM .....Finite Elemente Modell/Methode

GZ.....Geometriezwilling

IDEF0.....Integration Definition

IoT .....Internet of Things

ISO.....Internationale Organisation für Normung

IT .....Informationstechnologie

lat .....lateinisch

MBSE .....Model-Based Systems Engineering

MKS..... Mehrkörpersimulation

NASA..... National Aeronautics and Space Administration

NIST ..... National Institute of Standards and Technology

PLM ..... Product Lifecycle Management

PLZ ..... Produktlebenszyklus

PMI..... Product and Manufacturing Information

PZB..... Pneumatikzylinderboden

QP ..... Qualitätsprüfung

QS ..... Qualitätssicherung

SADT ..... Structured Analysis and Design Technique

STEP..... Standard for the Exchange of Product Model Data

UML..... Unified Modeling Language

USAF ..... United States Air Force

VDI ..... Verein Deutscher Ingenieure

W..... Wunsch

Symbolverzeichnis

$\overline{\mathbf{A}}_\mathbf{i}$ .....mittlerer Abstand

$\overrightarrow{\mathbf{cp}_\mathbf{i}}$.....geometrische Punktentität

$\overrightarrow{\mathbf{d}_\mathbf{i}}$ .....Richtungsvektor

$\overrightarrow{\mathbf{e}_\mathbf{i}}$.....Einheitsvektor

$\overrightarrow{\mathbf{n}_\mathbf{i}}$ .....Normalvektor

$\overrightarrow{\mathbf{r}_\mathbf{i}}$ .....Ortsvektor

$\overrightarrow{\mathbf{x}_\mathbf{i}}$.....Verschiebung

$\mathbf{G}'$ .....Teilgraph

$\mathbf{af}_\mathbf{i}$ .....Oberflächenentität

$\mathbf{c}_\mathbf{i}$.....Kreisentität

$\mathbf{cs}_\mathbf{1}$ .....Zylinder-/Kegelmantelflächenentität

$\mathbf{ec}_\mathbf{i}$.....Kantenentität

$\mathbf{el}_\mathbf{i}$ .....Berandungsentität

$\mathbf{e}'_\mathbf{1}$.....oberste Entität des Teilgraphen $\mathbf{G}'$

$\mathbf{l}_\mathbf{i}$ .....Linienentität

$\mathbf{ts}_\mathbf{1}$.....Torusmantelflächenentität

$\mathbf{vp}_\mathbf{i}$ .....topologische Punktentität

$\boldsymbol{D_i}$.....Durchmesser

$\boldsymbol{R_i}$.....Radius der Torus-Kreislinie

$\boldsymbol{r_i}$ .....Radius

$\boldsymbol{\alpha_i}$ .....Fasenwinkel

$\boldsymbol{\varphi_i}$.....Kegelhalbwinkel

$\Delta\boldsymbol{h}$ .....Betrag der Verschiebung / Höhenänderung

AF .....Menge von Oberflächenentitäten

C .....Menge von Kreisentitäten

CP .....Menge von geometrischen Punktentitäten

EC .....Menge von Kantenentitäten

EL .....Menge von Berandungsentitäten

G ..... Graph

L ..... Menge von Linienentitäten

N ..... Menge von Nachfolgerentitäten

V ..... Menge von Vorgängerentitäten

VP ..... Menge von toplogischen Punktentitäten

e ..... Entität

n ..... Nachfolgerentität

v ..... Vorgängerentität

O ..... Ursprung

P ..... Punkt

R ..... Kreislinie

h..... Abstand / Höhe / Versatz

r ..... Abstand

t ..... Zeit